

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах
рукопису» УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності: _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: Плівки металів для забезпечення електромагнітної сумісності
електронної апаратури

Виконала: студентка 2 курсу, групи ДП-91мп
(шифр групи)

_____ Снісаренко Ольга Вікторівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник: _____ доц., к.т.н. Мачулянський О.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю: доц., к.ф.-м.н., с.н.с Свєчніков Г.С. _____

Консультант з інформаційних питань доц. к.т.н., Діденко Ю.В. _____

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

Завдання на дипломний проект, дипломну роботу

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет: Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра: Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність (спеціалізація): 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ на магістерську дисертацію студенту Снісаренко Ользі Вікторівні (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Плівки металів для забезпечення електромагнітної сумісності електронної апаратури

керівник дисертації: доц., к.т.н. Мачулянський О.В.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації: _____

3. Об'єкт дослідження : Електромагнітний плівковий екран

4. Предмет дослідження: Ефективність екранування плівковим покриттям

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Аналіз основних підходів для забезпечення електромагнітної сумісності електронної апаратури. 2) Аналіз методу екранування як засобу ЕМС для електронної апаратури. 3) Моделювання ефективності екранування одношаровим електромагнітним

екраном. 4) Аналіз ефективності електромагнітного екранування плівковим покриттями.

6 Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Засоби електромагнітної сумісності електронної апаратури, модель ефективності екранування одношаровим електромагнітним екраном, результати досліджень, висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій: _____

8. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Основні підходи до забезпечення ЕМС (огляд літератури)		
2.	Аналіз екранування як засобу ЕМС електронної апаратури		
3.	Моделювання ефективності екранування одношаровим покриттям		
4.	Аналіз результатів досліджень		
5.	Оформлення магістерської дисертації		

Студент

(підпис)

Снісаренко О.В.
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Мачулянський О.В.
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 100 сторінках, вона містить 4 розділи, 30 ілюстрацій, 29 таблиць і 32 джерела в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є електромагнітний плівковий екран.

Предметом дослідження є ефективність екранування плівковим покриттям.

Метою роботи є аналіз екрануючих плівок металів для забезпечення електромагнітної сумісності компонентів електронної апаратури.

У першому розділі визначені загальні положення про електромагнітну сумісність, засоби її забезпечення, а також методи нанесення тонких плівок.

У другому розділі розглянуто метод екранування як засіб забезпечення ЕМС електронної апаратури.

У третьому розділі проведено моделювання ефективності екранування для тонких металевих плівок.

У четвертому розділі представлений розроблений стартап-проект на основі досліджень в виконаній роботі.

Ключові слова : ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ЕКРАН, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКРАНУВАННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ.

ABSTRACT

The work is presented on 10 pages, it contains 4 sections, 30 illustrations, 29 tables and 32 references in the list of references.

The object of research is an electromagnetic film screen.

The subject of research is the effectiveness of shielding with a film coating.

The aim of this work is to analyse the shielding films of metals to ensure the electromagnetic compatibility of components of electronic equipment.

The first section defines general provisions on electromagnetic compatibility, means of ensuring it, as well as methods of applying thin films.

In the second section, the method of shielding is considered as a means of ensuring EMC of electronic equipment.

In the third section, we simulate the screening efficiency for thin metal films.

The fourth section presents a developed start-up project based on research in the work performed.

Keywords: ELECTROMAGNETIC SCREEN, EFFICIENCY SHIELDING, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ.....	11
1.1 Загальні положення ЕМС	11
1.2 Основні засоби забезпечення ЕМС	21
1.3 Нормативна база в галузі ЕМС.....	28
1.4 Особливості застосування матеріалів для забезпечення ЕМС.....	32
1.5 Методи нанесення тонких плівок.....	35
2. ЕКРАНУВАННЯ ЯК ЗАСІБ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ЕМС	45
2.1 Основні засади екранування електромагнітного поля.....	45
2.2 Електромагнітне поле і його характеристики.....	48
2.3 Особливості ближнього і дальнього полів.....	52
2.4 Ефективність екранування	57
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНУВАННЯ ОДНАЩОРОВИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЕКРАНОМ.....	59
3.1 Основні розрахункові співвідношення	59
3.1.1 Втрати в екранах на поглинання.....	59
3.1.2 Втрати в екранах в наслідок відбиття.....	62
3.2 Аналітичний метод розрахунку ефективності електромагнітного екранування	65

3.3 Аналіз і обробка результатів моделювання	75
3.4 Аналіз і обробка результатів експерименту	80
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	85
4.1 Опис ідеї проекту	85
4.2 Технологічний аудит проекту	86
4.3 Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту	86
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	91
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	92
ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:	97

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЕМС – електромагнітна сумісність

РЕЗ – радіоелектронні засоби

НЕМП – ненавмисні електромагнітні перешкоди

ЕС – електронні засоби

РЧР – радіочастотний ресурс

НТД – нормативно-технічна документація

ЕМО – електромагнітна обстановка

ДП – джерело перешкод

РП – рецептор перешкод

ЕМП – електромагнітне поле

Н – напруженість магнітного поля

μ – магнітна проникність

σ – питома провідність

γ -коефіцієнт поширення хвилі в повітряному середовищі , або хвильове число

ВСТУП

Електронні системи, побудовані на основі сучасних досягнень мікроелектроніки, знаходять застосування у всіх сферах діяльності людини, займаючи важливі місця в медицині, фінансах, виробництві та національній безпеці. Ті ж технології, які забезпечують високі швидкості обробки інформації, мають підвищену чутливість до напруги і струму, що викликані електромагнітними полями від різних джерел штучного і техногенного походження. При досить високому рівні зовнішніх збурюючих полів можливий збій обладнання, порушення цілісності інформації, а в окремих випадках фізичного пошкодження обладнання. Це вимагає ефективного захисту обладнання від впливу як ненавмисних, так і навмисних електромагнітних впливів.

Неухильне зростання швидкодії електронних компонентів призводить до підвищення їх чутливості до впливу зовнішніх електромагнітних полів. Також за останні десятиліття істотно розширився робочий діапазон частот і зросли рівні потужності електромагнітних впливів, збільшилася кількість джерел перешкод найрізноманітнішої природи. Інтеграція ринку і розширення дії стандартів електромагнітної сумісності (ЕМС) змушують виробників все більше приділяти уваги методам і засобам забезпечення ЕМС. Екранування є одним з основних методів захисту електронної апаратури від зовнішніх дестабілізуючих електромагнітних впливів або усунення підвищених рівнів завад від апаратури. З цих причин екранування є одним з найважливіших чинників забезпечення ЕМС.

Системи управління з використанням напівпровідникових елементів, і особливо засновані на застосуванні процесорів, стали виконувати багато функцій, які раніше покладалися на електромеханічні або аналогові пристрої, такі як елементи релейної логіки або пропорційні контролери. На відміну від пристроїв з жорсткими програмами, які застосовувались раніше для виконання

конкретних завдань, програмовані електронні системи засновані на використанні цифрових систем, з'єднаних із загальною шиною, в якій відповідно до програмного забезпечення обробляється безліч сигналів. Така структура не тільки більш сприйнятлива до електромагнітних завад, тому що для зміни стану елемента необхідний низький рівень енергії, але і результат впливу завад неможливо передбачити тому, що випадковий імпульс може або порушити, або не порушити функціонування системи в залежності від його тимчасового положення стосовно стану зовнішнього тактового генератора, переданих даних і стану виконуваної програми. Тривала перешкода може не впливати на роботу схеми до тих пір, поки її рівень нижче, ніж граничний рівень логічних пристроїв, але коли перешкода збільшується подальше функціонування процесора буде повністю порушено.

Очевидно, що наслідки впливу перешкоди на систему управління залежатимуть від характеристик контролюваного процесу. У деяких випадках порушення процесу управління може привести до економічного збитку або небезпеки для життя. Обсяг зусиль, яких докладають для забезпечення ЕМС буде залежати від очікуваних наслідків порушення функціонування системи.

Метою даної роботи є аналіз екрануючих плівок металів для забезпечення електромагнітної сумісності компонентів електронної апаратури.

Виходячи з всього вищесказаного для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

1. Аналіз основних підходів для забезпечення електромагнітної сумісності електронної апаратури.
2. Аналіз методу екранування як засобу ЕМС електронної апаратури.
3. Моделювання ефективності екранування одношаровим електромагнітним екраном.
4. Аналіз ефективності електромагнітного екранування плівковим покриттям.

1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ

1.1 Загальні положення ЕМС

Проблема забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) радіоелектронних засобів (РЕЗ) виникла з насущних потреб радіоелектроніки. Першими результатами вирішення проблеми ЕМС були окремі успіхи по ослабленню впливу ненавмисних електромагнітних перешкод (НЕМП) [3,4]. Потім проблема ЕМС поширилася на всі види радіоелектронних і електронних засобів. Стало очевидним, що не можна проектувати, конструювати, виробляти і експлуатувати згадані засоби без урахування забезпечення їх ЕМС. Виявилося, що для подальшого розвитку радіоелектроніки завдання забезпечення ЕМС має не менше значення, ніж забезпечення апаратурної надійності роботи або мініатюризація тих же засобів. Тому будь-який фахівець в області радіоелектроніки повинен знати принципи забезпечення ЕМС і застосовувати свої знання в цій галузі при розробці, виробництві і експлуатації засобів. Все це говорить про те, що проблема забезпечення ЕМС перетворилася в новий самостійний науково-технічний напрям сучасної радіоелектроніки.

Характерна особливість нового напрямку - його комплексність, яка полягає в тому, що проблема забезпечення ЕМС проникає майже в усі існуючі напрямки радіоелектроніки, встановлює взаємозв'язки між ними і навіть об'єднує їх з позицій цілісності радіоелектроніки як галузі господарства.

У кожному конкретному випадку завдання забезпечення ЕМС вирішується шляхом системного підходу, що також є особливістю нового напрямку. «Системність» різних технічних засобів, що мають електромагнітні властивості, характеризується «параметрами ЕМС». Їх вивчення і використання в практичній діяльності збагачує теоретико-практичну базу радіоелектроніки.

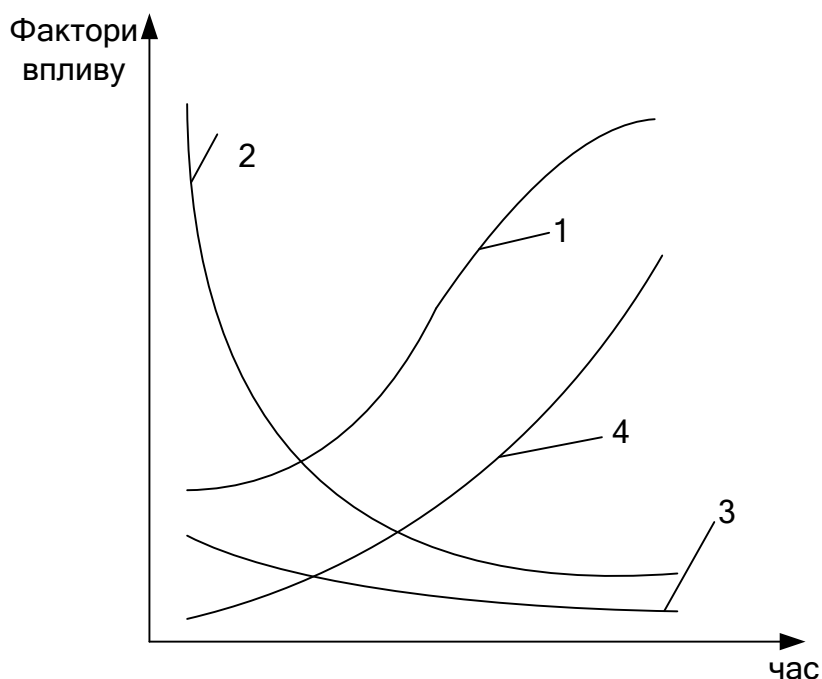


Рисунок 1.1 – Тенденції змін параметрів радіоелектронних засобів(1- зростання ККД (η) приладів, 2- зменшення рівня корисного сигналу, 3- зменшення рівня власних шумів, 4- зростання зовнішніх завад)

Електромагнітна сумісність радіоелектронного (електронного) засобу - це його здатність функціонувати спільно і одночасно з іншими засобами, що мають електромагнітні властивості, при можливій дії ненавмисних електромагнітних завад, не створюючи при цьому неприпустимих перешкод іншим радіоелектронним і електронним засобам.

Завдання боротьби з НЕМП виникло майже одночасно з радіотехнікою, але в той час самостійного значення не мало і особливих труднощів для свого рішення не представляла. Труднощі з'явилися зі збільшенням кількості радіозасобів, ускладненням їх функцій і створенням засобів нового призначення.

Значні труднощі стали відчуватися після другої світової війни, хоча в цей період активно освоювалися нові високочастотні діапазони, на яких ще не було

помітного рівня НЕМП. При цьому практика показала, що навіть при перспективності нових діапазонів процес використання вже освоєних діапазонів не тільки не зменшується, але ще більш зростає, що тягне за собою і зростання рівня НЕМП.

Понад півстоліття тому з'явилися перші електронні засоби (ЕС) самостійного функціонального призначення, спочатку обчислювальні, а потім для обробки сигналів (приведення їх до заданого виду) і засоби електронної автоматики.

Трохи пізніше були створені засоби нового виду - радіоелектронні, що становлять собою сукупність радіозасобів, що діють на принципах радіотехніки, і електронних, що діють на принципах електроніки. Така сукупність, в якій радіозасоби використовуються для передачі і прийняття сигналів за допомогою радіохвиль, а електронні - для обробки сигналів і перетворення їх в певний вид повідомлень, має єдине функціональне призначення.

Радіоелектронні засоби значно складніше радіозасобів, але ця складність дозволяє реалізувати нові функції в порівнянні з функціями радіозасобів, чому сприяють і феноменальні успіхи електроніки в області напівпровідникової мініатюризації.

Разом з вдосконаленням радіоелектронних засобів (РЕЗ) розвивалася і проблема забезпечення ЕМС РЕЗ. Розглядаючи етапи розвитку цієї проблеми, можна відзначити їх відповідність філософським категоріям. Процес розвитку, в якому протилежності є джерелом розвитку, чітко проглядається по суті проблеми ЕМС РЕЗ. Безперервне збільшення кількості радіоелектронних, електронних та електротехнічних засобів (що є наслідком науково-технічного прогресу) і безперервне зменшення можливості користування ресурсом радіоканалів (що є наслідком природної обмеженості цього ресурсу) представляються суперечливими факторами, тобто джерелами розвитку проблеми ЕМС РЕЗ. Недосконалість технічних засобів, що виявляється: в небажаних

радіовипромінюваннях, непродуктивно завантаженого ресурсу радіоканалів, і в зайвій сприйнятливості до випромінювань, що відрізняється від корисних, - є безпосередньою причиною їх розвитку.

Розглядаючи сучасний стан проблеми забезпечення ЕМС радіоелектронних і електронних засобів, можна конкретно сформулювати абстраговані напрямки, на які розчленовується проблема, і навколо яких концентруються наукові матеріали наростаючого потоку літератури, що характеризують поступальний розвиток проблеми в цілому. Графічна інтерпретація таких напрямків представлена на рис. 1, де показані їх зв'язку з проблемою ЕМС в цілому і з існуючою практикою забезпечення ЕМС радіоелектронних і електронних засобів.

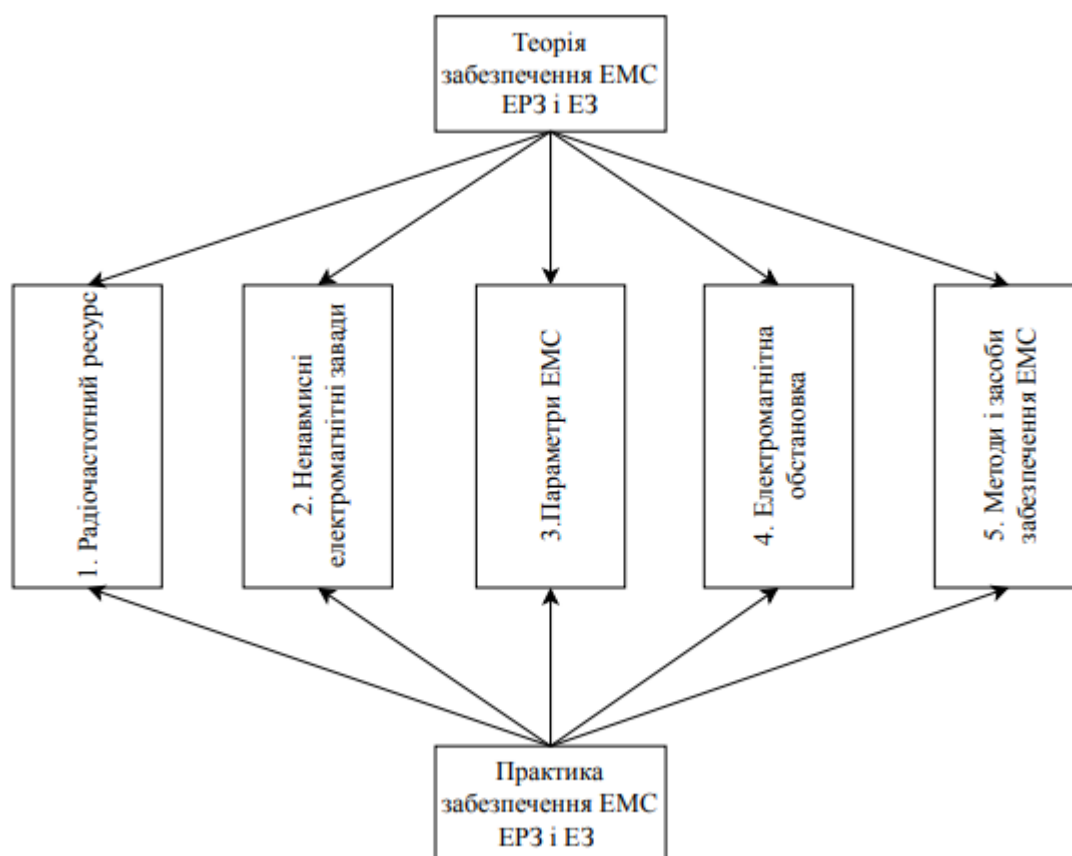


Рисунок 1.2 – До пояснення сучасного стану проблеми забезпечення ЕМС радіоелектричних засобів

1. Радіочастотний ресурс (РЧР) - це сукупність можливих для використання радіочастотних електромагнітних полів, що створюються з метою передачі (прийняття) інформації. Теоретичні аспекти: вивчення особливостей ресурсу і розробка ефективних методів його використання, в тому числі принципів управління ресурсом, включаючи економічні концепції; наукові основи розширення міжнародного та національного частотного планування та вдосконалення відповідної нормативно-технічної документації (НТД); прогнозування подальшого використання РЧР [3,4]. До практики відноситься контроль користування радіоканалами відповідно до прийнятих правил, збір інформації про використання РЧР та реалізація вимог міжнародної та національної нормативно-технічної документації (НТД) в області користування РЧР.

2. Ненавмисні електромагнітні перешкоди.

Виявлення джерел і визначення параметрів (характеристик) НЕМП - спільна задача і теоретичного аналізу, і практики. Крім того, до теорії відносяться: вивчення та моделювання НЕМП, їх класифікація та статистичний аналіз; вивчення джерел і шляхів поширення НЕМП, а також особливостей їх впливу на корисні сигнали; розробка методів вимірювань і принципів нормування допустимих рівнів НЕМП. До практики відноситься виявлення джерел і шляхів поширення НЕМП, розробка і реалізація вимог до їх нормування, збір інформації про типи і характеристики НЕМП, проведення вимірювань та експериментальні дослідження НЕМП.

3. Параметри (характеристики) ЕМС різних технічних засобів виражають ознаку системної властивості радіоелектронних, електронних та електротехнічних засобів, тобто можливості кожного такого засобу функціонувати одночасно і спільно з іншими технічними засобами в системі (системах). Цією ознакою параметри ЕМС будь-якого з перерахованих засобів відрізняються від функціональних параметрів тих же засобів, що виражають

можливість виконання ним свого призначення. До практики відносяться експериментальне вивчення параметрів ЕМС, включаючи їх кількісні, в тому числі статистичні, значення, і реалізація вимог НТД до таких параметрів в процесі створення засобів і їх експлуатації.

До теорії відноситься моделювання параметрів ЕМС з метою створення інженерних методів розрахунку і наукового обґрунтування шляхів вдосконалення параметрів ЕМС, а також дослідження при розробці НТД, що регламентує допустимі кількісні значення параметрів (характеристик) ЕМС технічних засобів.

4. Електромагнітна обстановка (ЕМО) - це реальні електромагнітні умови, в яких функціонує або має функціонувати конкретний засіб при наявності або відсутності корисного сигналу на його сигнальному вході при дії (або можливій дії) НЕМП через цей вхід або скрізь нього. ЕМО може бути зовнішньою або внутрішньою стосовно засобів конкретного призначення в певних просторових умовах, діапазонах і смугах частот. До практики визначення ЕМО відносяться вимірювання електромагнітних полів корисних сигналів і перешкод, а також напруг (струмів) в мережах первинних джерел електроживлення в заданих частотних і просторово-часових умовах в залежності від потреб в функціонуванні деякого технічного засобу. До практики відносяться також збір і аналіз інформації про використання радіоканалів з заданими частотами, про параметри (характеристики) НЕМП і параметрах (характеристиках) засобів, що функціонують в заданому пункті простору. Все це необхідно для аналізу ЕМС засобів будь-якої радіослужби.

До теорії відносяться методи аналітичної оцінки можливої ЕМО і прогноз ЕМО для засобу конкретного призначення. З цією метою створюються моделі ЕМО - імовірнісні, детерміновані і комбіновані, в ряді випадків дозволяють врахувати динаміку зміни ЕМО і можливість адаптації засобів до змін.

5. Методи і способи забезпечення ЕМС. Про зміст такого напрямку говорить його назва. Можна відзначити завдання забезпечення ЕМС на трьох рівнях радіоелектронних і електронних засобів. Перший рівень - забезпечення ЕМС між системами, наприклад космічний радіозв'язок, другий - забезпечення ЕМС всередині складного радіоелектронного комплексу, наприклад літального апарату, і третій - забезпечення ЕМС всередині блоків (приладів) між їх вузлами і компонентами, наприклад всередині блоку передавача.

За методами і способам забезпечення ЕМС накопичений значний практичний досвід як у вигляді загальних технічних рішень ослаблення НЕМП в їх джерелах і середовищі поширення, наприклад шляхом застосування фільтрів, екранів, раціонального монтажу, ефективного заземлення, так і у вигляді численних рішень схемного і конструктивно-технологічного характеру при створенні конкретних механізмів захисту від електромагнітного поля. Ефективність таких рішень підвищується, якщо вони передбачаються на початкових етапах розробки і виробництва виробів.

До теоретичних аспектів завдання забезпечення ЕМС відносяться аналіз, прогнозування і розрахунки ЕМС засобів на всіх згаданих вище рівнях. Це, наприклад, методи аналітичного визначення частотно-просторових розподілів між засобами конкретної радіослужби, методи теоретичного аналізу прогнозованих НЕМП всередині складного радіоелектронного комплексу або між вузлами блоку (приладу).

Умовно можна визначити п'ять аспектів проблеми ЕМС: інженерний, економічний, захисту інформації, маркетинговий та біологічний.

Таким чином, як випливає з визначення поняття ЕМС, ця проблема має два складники (рис. 1.3).

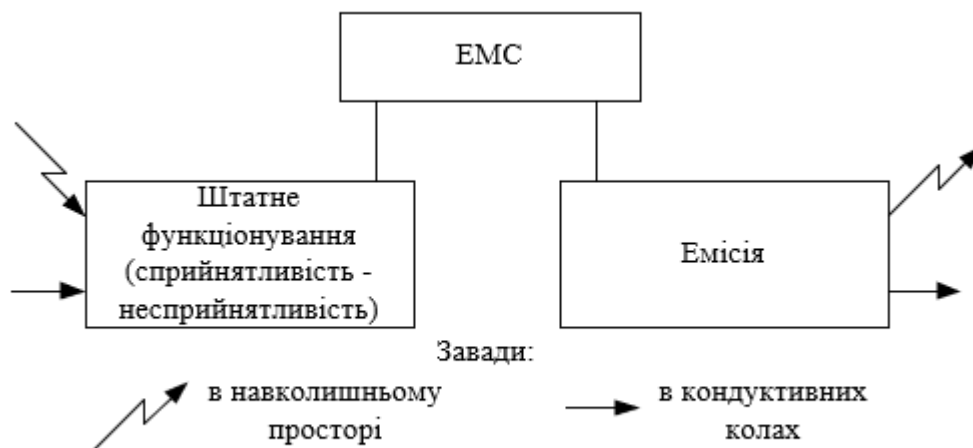


Рисунок 1.3 – Узагальнене представлення проблем ЕМС

Перша – це забезпечення штатного функціонування апаратури в умовах завад, або проблема забезпечення несприйнятливості (immunity) апаратури.

(Електромагнітна) сприйнятливості (susceptibility) – неспроможність пристрою, обладнання чи системи працювати без погіршення якості робочих характеристик за наявності електромагнітного збурення;

Друга – це забезпечення такої ситуації, що завади, які створює апаратура і поширює через навколишній простір та провідні елементи (кабелі, шасі, уземлювачі тощо) не перевищують допустимих рівнів, тобто це проблема емісії (emission) (рис. 1.3) Емісія – термін, який узагальнює будь-яким чином здійснення виходу енергії.

Емісія (електромагнітна) (emission (electromagnetic) – електромагнітне явище, за якого електромагнітна енергія сходиться від джерела;

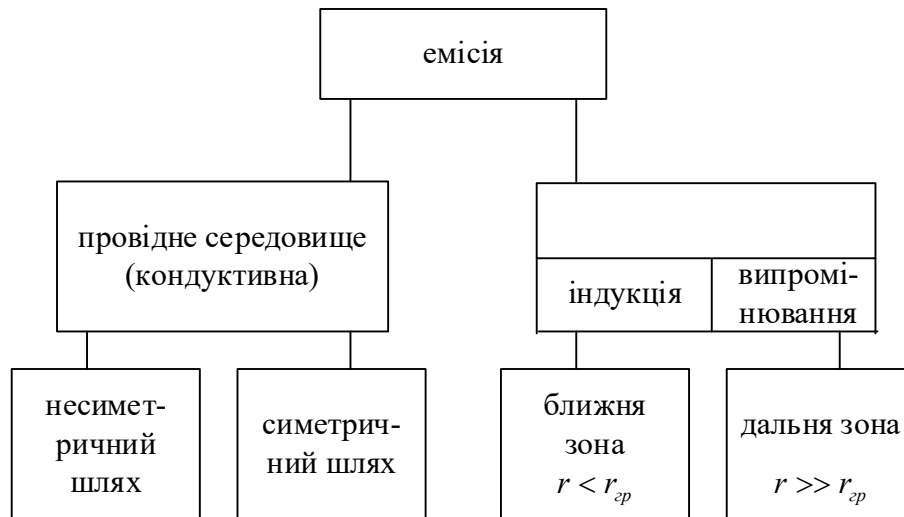


Рисунок 1.4 – Види та середовище емісії

Ця енергія може поширюватись в навколишньому просторі: в ближній зоні внаслідок явища індукції, в дальній зоні внаслідок випромінювання.

Ближня зона $r < r_{зр}$ (зона індукції), де для елементарних випромінювачів

$$r_{зр} = \frac{\lambda}{2\pi} \text{ та для інших } r_{зр} = \frac{2l^2}{\lambda}$$

де l – максимальний розмір будь-якого випромінювача;

λ – довжина хвилі;

$$\lambda = v / f ;$$

де $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ – швидкість поширення електромагнітної хвилі;

f – частота носія;

ε – діелектрична проникність;

для вільного простору $\varepsilon = \varepsilon_0 = (1/36)\pi 10^{-9} \text{ Ф/м}$;

μ – магнітна проникність;

для вільного простору $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Дальня зона $r \gg r_{зр}$ (зона випромінювання).

Окрім проблем ЕМС, пов'язаних із завадами, електромагнітна емісія в процесі роботи інформаційних систем, може проявляти себе як засіб для несанкціонованого доступу до інформації.

У сучасній літературі [5, 6, 7] канал витоку інформації, що виникає за наявності небажаних електромагнітних випромінювань і наведень, які створює комп'ютер або інша інформаційна система, називають загальним терміном ПЕМВН (побічні електромагнітні випромінювання і наведення). Під час дослідження рівнів ПЕМВН [1] засобів обчислювальної техніки виявлені інформаційні сигнали через:

- магнітне поле на частотах 0,1...30 МГц,
- електричне поле на частотах 6,7 кГц...705 МГц.

Як відомо, інформацію, що обробляють засобами обчислювальної техніки, можна відновити шляхом аналізу електромагнітних випромінювань, за умови застосування відповідних технічних засобів. Тому необхідність в надійному захисті інформації від несанкціонованого доступу є одним з актуальних технічних завдань. Завдання забезпечення безпеки полягає не лише у застосуванні захисного програмного забезпечення, але і в реалізації якісної апаратної бази, яка не дозволяє проникати інформаційним сигналам за межі зони, яку захищають.

Одним із засобів ослаблення рівнів ПЕМВН і вирішення завдань забезпечення ЕМС може бути застосування електромагнітного екранування електронних систем. Таким чином, застосування електромагнітних структур для екранування слід забезпечувати послаблення ПЕМВН в діапазоні частот, які в сучасних інформаційних системах охоплюють діапазон від десятків кілогерц до одиниць, десятків гігагерц, що є важливою і актуальною проблемою.

1.2 Основні засоби забезпечення ЕМС

Завдання забезпечення ЕМС РЕЗ має комплексний характер і на різних ієрархічних рівнях (елементів, вузлів і блоків пристроїв, РЕЗ та комплексів РЕЗ) вирішується за допомогою конструкторсько-технологічних, схемотехнічних, системотехнічних і організаційних заходів. На рис. 1.5 схематично зображено основні засоби забезпечення ЕМС. З'ясуємо окремо основні засоби забезпечення ЕМС.

ЕМС на рівні ланцюгів і вузлів забезпечують, головним чином, конструкторсько-технологічними заходами, що включають вибір елементної бази, раціональне компонування елементів, постановку екранів і фільтрів, що виключають небажане проникнення випромінювання від ланцюга до ланцюга, від вузла до вузла і небажаний вплив зовнішніх випромінювань на ланцюги і вузли.

ЕМС на рівні пристроїв (передавачів, приймачів, антен) забезпечують схемотехнічними заходами (вибором елементної бази, схем, режимів), дотримуючись принципу - не випромінювати і не приймати нічого зайвого. У передавачах важливо забезпечити випромінювання тільки корисного сигналу, призначеного для перенесення інформації, і зменшити позасмугове і все побічне випромінювання. Для цього характеристики передавачів строго регламентується. Наприклад, згідно з ГОСТ 13924-80, середня потужність побічного колювання, що надходить до антени, для радіомовних стаціонарних передавачів з номінальною потужністю 1 ... 50 кВт повинна бути не більше 50 мВт, а для більш потужних - не більш -60 дБ щодо середньої потужності на робочій частоті. У приймачах важливо підвищити частотну вибірковість по основному каналу, послабити всі побічні канали прийняття, зменшити дію інтермодуляційних і перехресних спотворень і ефекту блокування. Для цього характеристики вибірковості приймачів детально регламентуються. Їх опис досить великий [8].

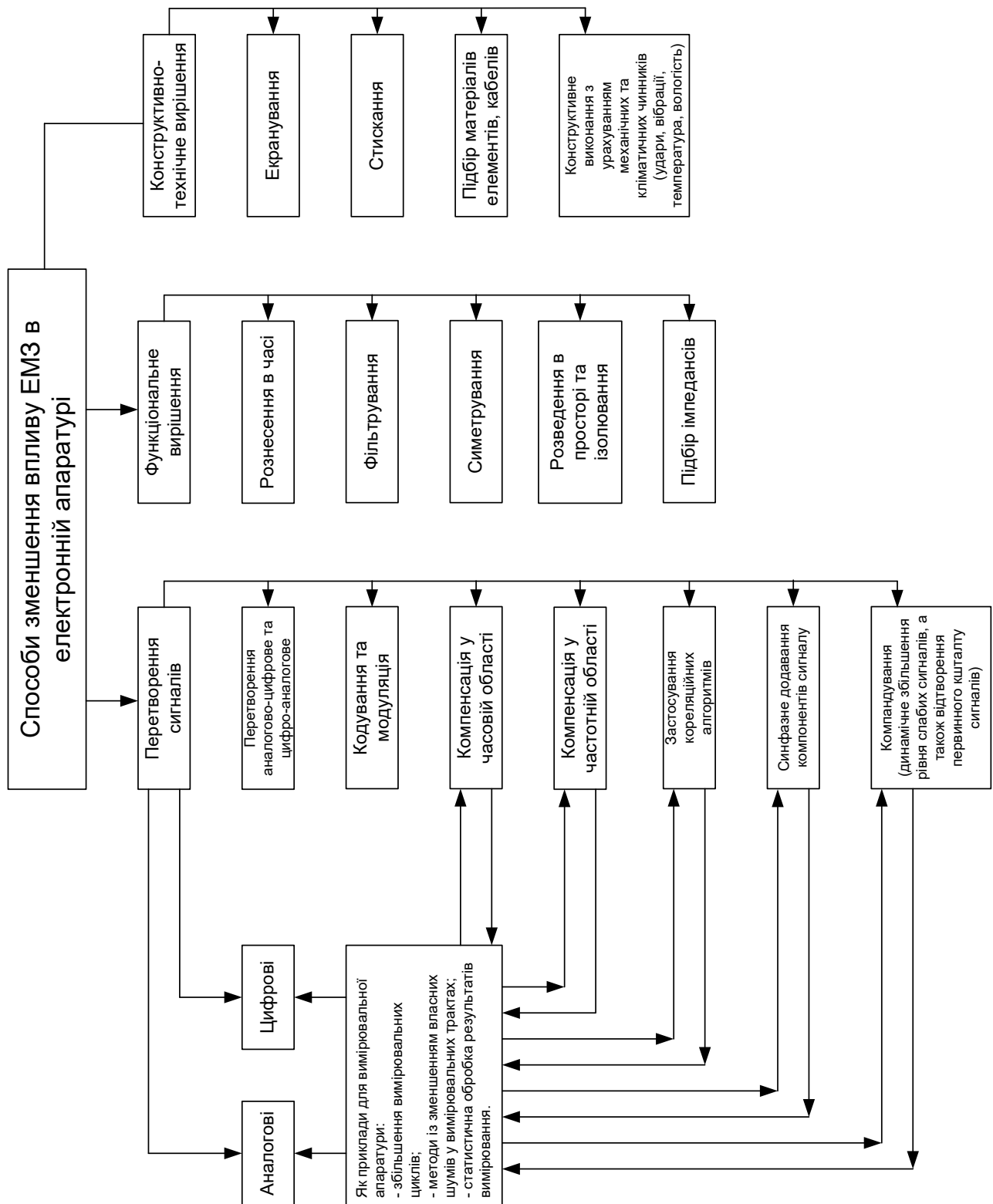


Рисунок 1.5 – Способи зменшення впливу електромагнітних завад в електронній апаратурі

ЕМС РЕЗ та комплексів РЕЗ забезпечують, комбінуючи розв'язки джерел і об'єктів впливу перешкод:

- частотні (зміна частоти роботи передавача або приймача);
- амплітудні (просторовий розподіл передавачів і приймачів; використання спрямованих антен; використання поляризаційних властивостей антен; поліпшення виборчих властивостей вихідних ланцюгів передавача і виборчих властивостей приймача);
- тимчасові (тимчасова селекція; скорочення часу випромінювань; застосування імпульсних режимів роботи; тимчасова синхронізація роботи РЕЗ; тимчасова регламентація).

Суть організаційно-технічних заходів з позицій використання радіочастотного ресурсу полягає в організації раціонального його використання певними категоріями користувачів. Серед всієї сукупності зазначених заходів можна виділити дві основні групи:

- розподіл ресурсу між різними категоріями користувачів. Наочним трактуванням змісту цих заходів є розподіл в просторі V-F-T необхідних областей, що відповідають тим чи іншим категоріям користувачів;
- регламентування допустимої протяжності займаних областей, відповідних джерел і рецепторів різних категорій. Зазначена регламентація полягає в стандартизації параметрів ЕМС для різних груп апаратури і забезпеченні правових і технічних основ дотримання зазначених норм. З точки зору використання радіочастотного ресурсу суть цієї групи заходів полягає в регламентації розмірів необхідних областей і допустимих перевищень займаних областей, відповідних джерел і рецепторів перешкод різних категорій.

До числа системотехнічних відносяться різні заходи, що вживаються для забезпечення спільної роботи різних пристроїв - складових елементів деякої

системи, що визначається як сукупність пристроїв, призначених для вирішення спільних завдань даної сукупності засобів. Також системотехнічні заходи є одним із засобів досягнення умов спільної роботи пристроїв як елементів різних систем (міжсистемна ЕМС). У будь-якому випадку відмітною ознакою системотехнічних заходів є те, що вони проводяться в одному з наступних напрямків:

- вибір, забезпечення або, в разі потреби, зміни принципу роботи системи, спрямовані на скорочення протяжності розмірів необхідних областей, відповідних випромінюванням радіопередавальних пристроїв та (або) сприйнятливості рецепторів - радіоприймальних пристроїв як елементів розглянутих систем,

- планування, розподіл або, в разі потреби, перерозподіл доступної частини радіочастотного ресурсу між елементами, що входять в дану систему (системи).

Першу з перерахованих груп представляють різноманітні методи і технічні рішення, які стосуються побудови систем з урахуванням забезпечення умов спільної роботи в умовах як створюваної електромагнітної обстановки, так і існуючої внаслідок роботи вже наявних засобів.

Склад зазначеної групи засобів досить великий. До їх числа можна віднести:

- вибір способу передачі інформації - виду і параметрів модуляції з метою скорочення по можливості необхідної ширини смуги частот .

- використання завадостійких цифрових методів кодування інформації, кодів з корекцією помилок і т.д. Ефект скорочення протяжності областей сприйнятливості рецепторів в даному випадку полягає в зниженні сприйнятливості рецепторів до перешкод. Крім того, використання завадостійких методів передачі інформації відкриває можливості в ряді випадків знизити потужності відповідних радіопередавачів, що може інтерпретуватися як скорочення протяжності областей, відповідних джерел перешкод;

- використання принципу територіально-розподілених радіопередавальних пристроїв. Згідно з цим принципом необхідна зона обслуговування забезпечується розбивкою її на ряд зон меншою протяжності, що обслуговуються радіопередавачів меншої потужності;

Друга з названих груп має в основі ті чи інші засоби, що не торкаються принципу дії системи, і мають на меті раціональний розподіл доступного радіочастотного ресурсу між окремими засобами

Зміст схемотехнічних заходів забезпечення ЕМС становлять різні технічні засоби, що відносяться до схемних рішень апаратури і вибору параметрів елементів, спрямованих на поліпшення показників, що впливають на ЕМС і не зачіпають ні принцип дії апаратури, ні її системні параметри (функціональні параметри пристроїв і їх блоків). З точки зору використання радіочастотного ресурсу результат прийняття схемотехнічних заходів полягає в скороченні протяжності займаних областей в просторі, відповідних конкретних джерел перешкод і рецепторів. Зменшення розмірів цих областей може робитися або з метою приведення займаних областей у відповідність з існуючою або перспективною нормативно-технічною документацією (тобто з метою відповідності стандартним вимогам), або ці заходи вживаються стосовно апаратури, що відповідає існуючим нормативам. У цих випадках мова йде про забезпечення ЕМС на рівні пристроїв, коли з тих чи інших причин параметри ЕМС на рівні стандартних значень не дозволяють забезпечити умови допустимості рівня впливу перешкод. З деякою часткою умовності можна виділити дві характерні групи схемотехнічних заходів.

До першої з них слід віднести використання будь-яких схемних рішень пристроїв, їх параметричну оптимізацію, застосування елементної бази з поліпшеними показниками, що впливають на ЕМС і т.д. У будь-якому випадку мета цих заходів полягає в поліпшенні деяких конкретних параметрів ЕМС.

Заходи цієї групи належать до етапу створення радіоелектронних пристроїв, коли в число їх технічних показників входять конкретні значення певних параметрів ЕМС. По суті використання схмотехнічних заходів ЕМС на цьому етапі означає проектування (створення) конкретного пристрою, що володіє заданими функціональними параметрами і відповідає певним вимогам до параметрів ЕМС. Ці вимоги задаються розробнику відповідної апаратури в якості вихідних даних, а виконання їх стає предметом професійної діяльності фахівців відповідного профілю: фахівців по радіопередавачам, радіоприймачам, антенам, пристроїв електроживлення і т.д. В першу чергу ці вихідні дані визначаються нормативно-технічною документацією для відповідної області. В інших випадках - ці вимоги, визначені на системотехнічному рівні, можуть виявитися більш жорсткими стосовно діючої НТД.

- До другої групи слід віднести різні схемні рішення, що складаються у введенні елементів або пристроїв, що дозволяють додатково послабити рівні створюваних перешкод, сприйнятливості рецепторів і збільшити ослаблення НЕМП на шляху поширення від конкретного джерела перешкод до конкретного рецептора.

Мета прийняття конструкторсько-технологічних заходів забезпечення ЕМС полягає в зниженні рівнів створюваних перешкод джерела перешкод (ДП), сприйнятливості рецепторів перешкод і підвищення загасання електромагнітних полів на шляхах поширення від ДП до РП. На відміну від системо- і схмотехнічних заходів, вони не зачіпають ні принцип дії пристроїв, ні їх принципових схем, ні, відповідно, функціональних параметрів. На відміну від узагальнюючого американського терміна «design» у вітчизняній класифікації розрізняють поняття «проектування», «конструювання» і «технологія виробництва». Конструкторсько-технологічні заходи ЕМС відносяться до двох останніх. З позицій використання радіочастотного ресурсу конструкторсько-технологічними заходами забезпечується скорочення протяжності займаних

областей з метою забезпечення відповідності параметрів, що відповідають конкретним вимогам на ЕМС, нормативним вимогам, або забезпечення значень, визначеним на етапі проектування.

Використовувані в практиці забезпечення ЕМС конструкторсько-технологічні заходи представлені двома групами. Першу з них представляють різні засоби, які стосуються виконання технічних засобів, в тому числі до їх конструкції і технології виготовлення. Склад цієї групи досить широкий:

- електричні контакти;
- ущільнювальні елементи;
- низькочастотні і радіочастотні з'єднувачі;
- корпуси електромагнітних екранів і пристроїв з екрануючими властивостями, в тому числі способи з'єднання їх елементів;
- влаштування заземлення;
- способи монтажу

Реалізація на практиці засобів цієї групи становить предмет професійної діяльності інженерів-конструкторів і інженерів-технологів, які здійснюють конструювання та підготовку до виробництва виробів (технічних засобів) з урахуванням вимог ЕМС. Відомості про зміст конкретних засобів цієї групи містяться в джерелах відповідного профілю.

До другої групи належать спеціальні конструкторські засоби, що служать цілям забезпечення ЕМС на відповідному рівні. До числа цих засобів відносяться:

- екранування елементів і блоків РЕЗ;
- екранування провідників;
- заземлення;
- групування провідників в міжблочні з'єднання;
- зонування елементів і компоновка їх на платі, в пристрої і т.д.

Використання зазначених прийомів також належать до області професійної діяльності інженерів-конструкторів. Однак початкові відомості про зміст цих

заходів корисні фахівцям, зайнятим проектуванням і експлуатацією технічних засобів.

В галузі, пов'язаній з проблемою забезпечення ЕМС є проблема захисту від несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації. Проблема обумовлена фізичним явищем індукції (в ближньому полі) та випромінювання в (в дальньому полі). Узагальнено це так зване явище побічних електромагнітних випромінювань та наведень (ПЕМВН). Отже, це призводить до можливості із використанням спеціальних засобів несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації. Це стосується конфіденційної інформації державних установ, силових структур, служби безпеки держави, комерційних структур (банків, фірм, установ тощо). В сучасних умовах політичної відкритості суспільства, інтенсивного розвитку підприємств тощо, ця проблема набуває надзвичайно актуального характеру.

1.3 Нормативна база в галузі ЕМС

Структура формування нормативної бази в галузі ЕМС на міжнародному та європейському рівнях показана на рисунку 1.6.

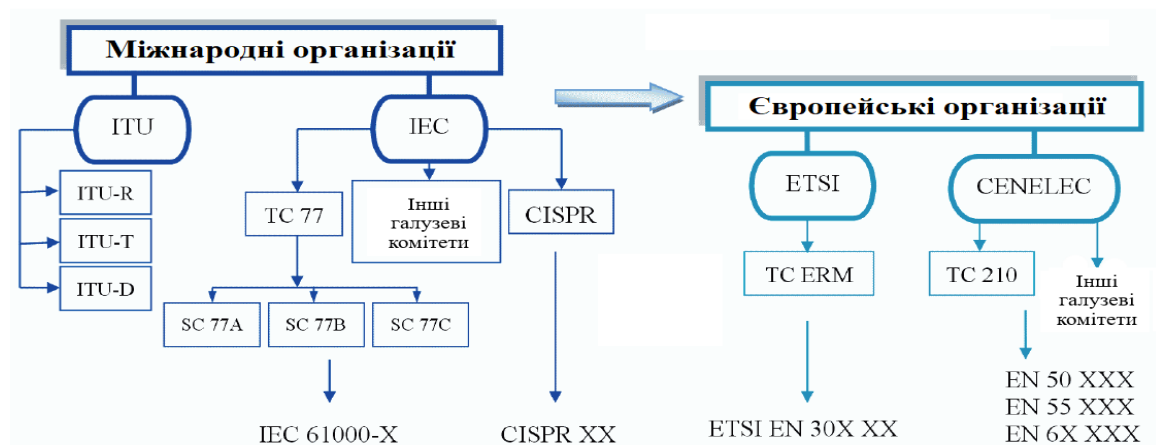


Рисунок 1.6 – Міжнародні та європейські організації, які розробляють стандарти в області ЕМС

На міжнародному рівні створенням нормативних документів в галузі ЕМС займаються Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) і Міжнародна електротехнічна комісія (IEC). ITU приймає міжнародні норми і договори, управляє використанням земного спектра частот, розробляє рекомендації в галузі управління радіочастотним спектром. Основним документом, що визначає порядок управління використанням радіочастотного спектра, є Регламент радіозв'язку ITU, містить міжнародну таблицю розподілу радіочастот [10]. ITU включає три основні сектори – ITU-R (сектор радіозв'язку), ITU-T (сектор стандартизації електрозв'язку) і ITU-D (сектор розвитку електрозв'язку).

На європейському рівні розглядом питань займаються Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) і Європейський комітет зі стандартизації в галузі електротехніки (CENELEC).

Технічний комітет ETSI TC ERM (ЕМС і питання радіочастотного спектра) несе відповідальність за розробку стандартів по ЕМС для обладнання телекомунікаційних мереж (виключаючи абонентське обладнання), для обладнання радіозв'язку, а також для радіомовних передавачів.

CENELEC включає в себе технічний комітет TC 210 «Електромагнітна сумісність» та ряд технічних комітетів, підкомітетів і робочих груп, які також вирішують питання ЕМС. CENELEC розробляє європейські норми, що забезпечують застосування Директиви ЕМС [11].

Ця Директива є однією з 21 Директив Нового і Глобального підходів Європейського Союзу, в яких сформована система гармонізації вимог щодо безпеки продукції. Новий підхід передбачає в основному створення єдиної загальноєвропейської нормативної бази, що визначає вимоги до продукції. Його основні принципи зводяться до наступного:

- в директивах на продукцію задаються обов'язкові для виконання суттєві вимоги (essential requirements)) безпеки;

- завдання встановлення конкретних значень характеристик продукції покладається на європейські стандарти, а в перехідний період - на національні стандарти;
- стандарти зберігають свій добровільний статус;
- продукція, випущена відповідно до гармонізованих (з директивою) стандартів, розглядається як відповідна суттєвим вимогам даної директиви (принцип презумпції відповідності);
- факт відповідності гармонізованим стандартам, підтверджений певним способом (процедурою), є реалізацією принципу презумпції відповідності;
- якщо виробник продукції не бажає скористатися гармонізованим стандартом або такого стандарту немає, він повинен довести, що продукція, що випускається відповідає основним вимогам директиви, як правило, за допомогою третьої сторони (уповноваженого органу).

Таблиця 1.1 – Нормативні документи на основну номенклатуру продукції Директиви ЕМС 2004/108/ЕС

Основна номенклатура продукції	Стандарти, що забезпечують виконання вимог ЕМС	
	завадоемісія	завадостійкість
1	2	3
1 Електропобутове і аналогічне обладнання і комплектувальні вироби	EN 55014-1:2006	EN 55014-2:1997
2 Світлотехнічна продукція	EN 55015:2006	EN61547:2009
3 Радіоелектронна побутова апаратура (телевізійні приймачі. Звукова апаратура)	EN 55013:2001	EN 55020:2007
4 Професійна аудіо-, відео-. аудіовізуальна апаратура та апаратура керування світловими приладами для видовищних заходів.	EN 55103-1:2009	EN 55103-2:2009

Продовження таблиці 1.1

5 Устаткування для інформаційних технологій	EN 55022:2006 + A1	EN 55024:1998 + A1 + A2
6 Обладнання для передачі сигналів в низьковольтних електричних мережах	EN50065-1:2001	EN50065-2-1:2003 EN 50065-2-2:2003 EN 50065-2-3 :2003
7 Устаткування промислове, наукове та медичне радіочастотне	EN55011:2009	
8 Електричні лічильники, реле часу для тарифікації та регулювання навантаження	EN 62052-11:2003 EN 62052-21:2004	
9 Морська радіонавігації, радіокерування	EN 60945:2002	
10 Регулятори автоматичні електричні побутового та аналогічного призначення	EN 60730-1:2000 серія стандарту EN 60730-2-X	
11 Вимикачі для побутових та аналогічних стаціонарних електричних установок	EN 60669-2-1:2004	
12 Програмовані контролери	EN61131-2:2007	
13 Низьковольтна комутаційна апаратура і апаратура управління	EN 60947-1:2007 серія стандарту EN 60947-X	
14 Системи сигналізації	EN 50130-4:1995	
15 Системи безперебійного живлення	EN 62040-2:2006	
16 Устаткування зварки	EN 60974-10:2007	
17 Керовані залишковим струмом пристрої захисту побутового та аналогічного призначення	EN 61543:1995	
18 Системи силового електроприводу з регульованою швидкістю	EN 61800-3:2004	

Глобальний підхід по суті визначає основи процедур і умов обов'язкового підтвердження відповідності продукції.

Таким чином, чільним принципом процедур оцінки відповідності, прийнятих в країнах ЄС, служить принцип презумпції відповідності, згідно з яким поки не доведено протилежне, виробник в юридично обов'язковій формі (у формі декларації про відповідність) заявляє, що його продукція відповідає одному або декільком гармонізованим стандартам [12].

Як і до будь-якої іншої директиви Нового і Глобального підходів, до Директиви по ЕМС 2004/108 / ЄС розроблений Перелік стандартів, відповідність вимогам яких є доказом відповідності продукції вимогам по ЕМС. У табл. 1.1 наведено перелік стандартів Директиви ЕМС 2004/108 / ЄС, що охоплює узгоджену номенклатуру продукції.

1.4 Особливості застосування матеріалів для забезпечення ЕМС.

Екрани – це металеві перегородки, які можна виконувати із провідних матеріалів (мідь, алюміній тощо) із параметрами $\sigma_r \approx 1$, $\mu_r \approx 1$ та феромагнітних (сталь та інші) $\sigma_r \approx 0,1$, $\mu_r \approx 1000$ і вище.

Якщо застосувати для екрана замість матеріалу з високою провідністю – феромагнітний матеріал, це призведе до збільшення відносної магнітної проникності μ_r , але до дещо зменшення відносної питомої провідності σ_r . Також треба враховувати такі особливості застосування екранів:

- втрати внаслідок поглинання зростають, оскільки у більшості магнітних матеріалів магнітна проникність зростає більш інтенсивно, ніж зменшується провідність;
- втрати внаслідок відбиття зменшуються через збільшення опору екрана;
- загальні втрати в екрані – це сума втрат на поглинання і відбиття;
- у ситуації магнітних полів низької частоти втрати внаслідок відбиття дуже малі і основним механізмом екранування є втрати внаслідок поглинання;

– для низькочастотного електричного поля та плоских хвиль екранування спричинене головним чином відбиттям;

Окрім того, якщо застосовують екран з магнітного матеріалу, необхідно враховувати такі його властивості:

- зменшення з частотою магнітної проникності;
- залежність магнітної проникності від значення напруженості поля;
- можливість зміни магнітних властивостей матеріалів з високою магнітною проникністю.

Із зростанням частоти магнітна проникність (зазвичай вказують статичні значення) буде меншою. З рис. 1.7 випливає, що мю-метал має у 13 разів більшу статичну магнітну проникність, ніж сталь, однак на частоті 100 кГц його властивості гірші, ніж у сталі. Традиційні матеріали з високою магнітною проникністю є кращими для екранування магнітних полів на частотах до 10 кГц.

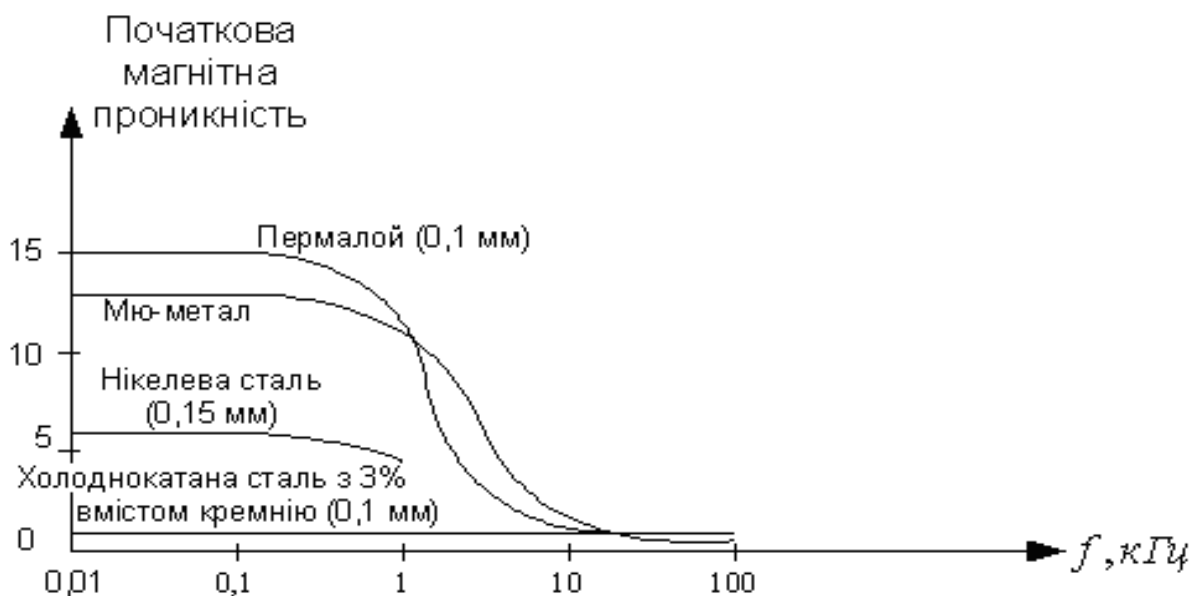


Рисунок 1.7 – Залежність магнітної проникності різних матеріалів від частоти

Ефективність магнітних матеріалів, як екранів залежить також від напруженості магнітного поля H . Статистична магнітна проникність є

відношення B до H . Максимальне значення магнітної проникності, й відповідно екранувальної здатності має місце для середнього значення напруженості поля. Для менших і більших значень екранувальна здатність менша. Зі збільшенням значення магнітної проникності, значення напруженості поля, що призводить до насичення зменшується.

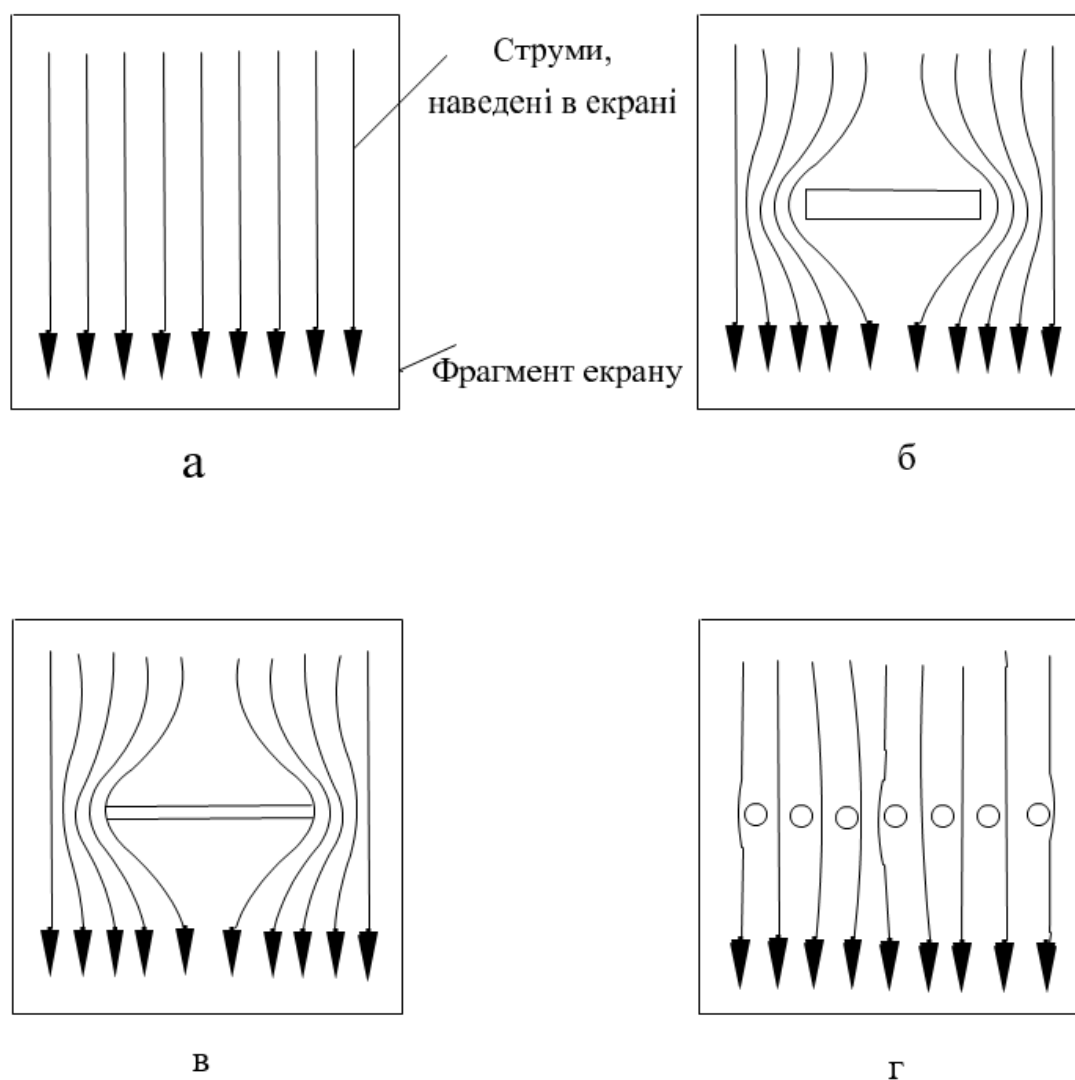


Рисунок 1.8 – Ілюстрація впливу форми та розміру отворів в екрані на наведений струм: а – суцільний екран, б – прямокутна широка щілина, в – прямокутна вузька щілина, г – круглі рівномірно розташовані отвори

Хвильовід, довжина якого дорівнює трьом діаметрам, забезпечує послаблення здебільшого 100 дБ. Для хвильовода квадратного перерізу з повітряним середовищем частоту зрізу розраховують, як

$$f_z = 150/d, \quad (1.1)$$

де d – розмір перерізу хвильовода, м.

З'єднання виконані як неперервний зварювальний або паяльний шов, забезпечують максимальне екранування. Клепані або гвинтові з'єднання менш бажані. Якщо є гвинти, їх необхідно розташовувати якомога ближче один до одного. Всіма засобами необхідно зберігати електричну неперервність (провідність) з'єднання для того, щоб не допустити утворення щілинної антени. Може виникнути необхідність у тому, щоб встановити на з'єднання прокладки, що захищають від електромагнітних завад. Існують провідні прокладки, які дають змогу регулювати виток у діапазоні частот від часток кілогерц до десятків гігагерц.

1.5 Методи нанесення тонких плівок

Як правило, методи осадження плівок поділяють на фізичні (Physical Vapor Deposition) і хімічні (Chemical Deposition). Фізичні методи засновані на транспорті матеріалу плівки в атомному вигляді від твердофазного джерела, або мішені, до підкладки з подальшою конденсацією і формуванням покриття. В основі хімічних методів лежить осадження газоподібних або рідких прекурсорів та утворення плівки в результаті хімічних перетворень прекурсорів на поверхні підкладки або в безпосередній близькості від неї. Іноді чіткий поділ фізичних і хімічних методів провести досить важко: фізичний метод випаровування металів може поєднуватися з їх окисленням, а електрохімічні технології отримання

плівок, що поєднують ознаки як фізичних, так і хімічних методів, за доцільне виділити в самостійну групу.

Термін Physical Vapor Deposition (PVD) був введений авторами книги «Vapour Deposition» («Осадження з газової фази») в 1966 р [14], однак Майкл Фарадей використовував дану технологію для отримання покриттів ще в 1838 р

- Процес нанесення плівки фізичними методами включає наступні основні стадії:
- генерація газової фази;
- спрямований масоперенос частинок речовини від джерела до підкладки;
- конденсація частинок на поверхні підкладки і утворення плівкового покриття.

Необхідною умовою фізичного осадження плівок є створення в робочій камері високого вакууму для того, щоб забезпечити транспорт атомів до підкладки і виключити їх взаємодію з частинками газової фази. Тому фізичні методи отримання плівок називають також вакуумними.

Під вакуумом розуміють середовище, що містить газ при тиску значно нижче атмосферного. Вакуум характеризується співвідношенням між довжиною вільного пробігу молекул газу λ і характерним розміром посудини d . При низькому вакуумі ($p > 10^2$ Па) середня довжина вільного шляху молекул λ значно менше характерного розміру посудини d . Молекули при цьому постійно врізаються один в одну. При зіткненні зі стінками посудини молекули газу адсорбуються на них. В умовах низького вакууму на стінках посудини постійно є шар адсорбованих молекул. Середній вакуум ($p = 10^2 \div 10^{-2}$ Па) характеризується тим, що середня довжина вільного шляху молекул λ приблизно дорівнює характерному розміру посудини d . У високому вакуумі ($p = 10^{-2} \div 10^{-7}$ Па) середня довжина вільного шляху молекул λ значно більше характерного розміру посудини d .

Чим вище необхідний рівень вакууму, тим складніше обладнання для його створення і контролю, а також для проведення технологічних операцій у вакуумній камері. Високовакуумна техніка являє собою складні дорогі прилади. Тому собівартість плівок, нанесених фізичними (вакуумними) методами, особливо якщо вони не автоматизовані, досить висока.

Вакуумні методи осадження плівок відрізняються способами генерації газової фази, режимами й умовами масопереносу і плівкоутворення. Основними механізмами перекладу атомів твердофазної мішені в газову фазу є термічне випаровування та іонне розпилення мішені високоенергетичними іонами або атомами. Газові потоки, які генеруються методами випаровування і розпилення, характеризуються різними значеннями енергії частинок, ступеня іонізації, щільності потоків; тому плівки, отримані з розпорошених або випаровуваних частинок, відрізняються структурою і, відповідно, властивостями.

В останні десятиліття активно розвиваються хімічні методи осадження плівок. Хімічні методи є безвакуумними, що дозволяє спростити технологічний процес і зменшити вартість плівок. За допомогою хімічних технологій легко отримувати плівки складного складу з високим ступенем гомогенності і контролювати їх склад і морфологію.

Хімічні методи отримання плівок класифікують на дві групи: одна заснована на осадженні з газоподібних прекурсорів, а інша - на осадженні з рідких розчинів прекурсорів.

Розглянемо принципи методу CVD. Отримання плівки засноване на гетерогенній реакції летючих з'єднань компонентів плівки на поверхні підкладки з утворенням нелетучої твердофазної плівки необхідного складу. Процес осадження плівки з газової фази складається з наступних стадій:

- генерація газової фази: утворення суміші вихідних сполук (прекурсорів) в заданому співвідношенні і інертного газу носія і надходження її в реакційну камеру з певною швидкістю;

- транспорт частинок газової фази до підкладки;
- адсорбція частинок газової фази на поверхні підкладки;
- розкладання прекурсорів на поверхні підкладки і утворення плівки;
- десорбція газоподібних продуктів реакції і видалення їх з реакційної камери.

В технології CVD застосовують різні способи генерації газової фази. Один із способів формування газової фази - введення в реакційну камеру через інжектор рідких розчинів, які при нагріванні утворюють леткі сполуки і осідають на поверхні підкладки ((Direct Liquid Injection CVD). Даний метод дозволяє генерувати пари з високою концентрацією прекурсорів, що сприяє більш швидкому зростанню плівки. Метод привабливий при використанні прекурсорів з низьким тиском парів.

Метод CVD має безліч переваг:

- можливість отримання однорідних плівок з високою адгезією не тільки на плоских поверхнях, але і на підкладках складної форми, що, як правило, недосяжно при використанні фізичних методів осадження;
- можливість отримання моно-, полікристалічних, аморфних і епітаксійних плівок;
- швидкість осадження може варіюватися від дуже низької (частки нанометра в годину) для вирощування епітаксійних плівок до високої (десятки мікрометрів в годину) для отримання товстих захисних покриттів;
- можливість використання широкого спектра прекурсорів - халькогенідів, гідридів, металоорганічних з'єднань;
- метод дозволяє отримувати плівки різного складу - металеві, карбідні, нітрідні, оксидні, сульфідні;
- базовий метод CVD є порівняно економічним.

Слід зазначити, що технологія CVD не позбавлена недоліків.

Суттєвим обмеженням є відхилення складу плівки від складу мішені, що пов'язано з різною швидкістю випаровування прекурсорів. Однак цей недолік проявляється лише при осадженні багатокомпонентних матеріалів, і усувається він шляхом оптимізації складу вихідної суміші прекурсорів. Інша складність пов'язана з необхідністю високої температури (600°C і вище) для протікання процесів CVD, що обмежує вибір матеріалу підкладок.

Оскільки ми використовуємо плівки металів, розглянемо на прикладі один з методів вакуумного осадження.

Електронно-променеве випаровування (Electron Beam Physical Vapor Deposition). В основі методу лежить принцип випаровування матеріалу мішені-анода за рахунок впливу на нього потоку електронів, емітуємого катодом електронно-променевого випарника. Потік електронів фокусується на мішені за допомогою магніту. Електронний промінь нагріває мішень до температури плавлення, а потім і випаровування, випаровування відбувається в високому вакуумі (до 10^{-8} Па), що забезпечує високу чистоту процесу. Матеріал мішені зазвичай закладають в тигель, або випаровування здійснюють з рідкої лунки масивної мішені, що виключає забруднення матеріалом тигля. Принципова схема осадження плівок методом електронно-променевого випаровування представлена на рис. 1.10.

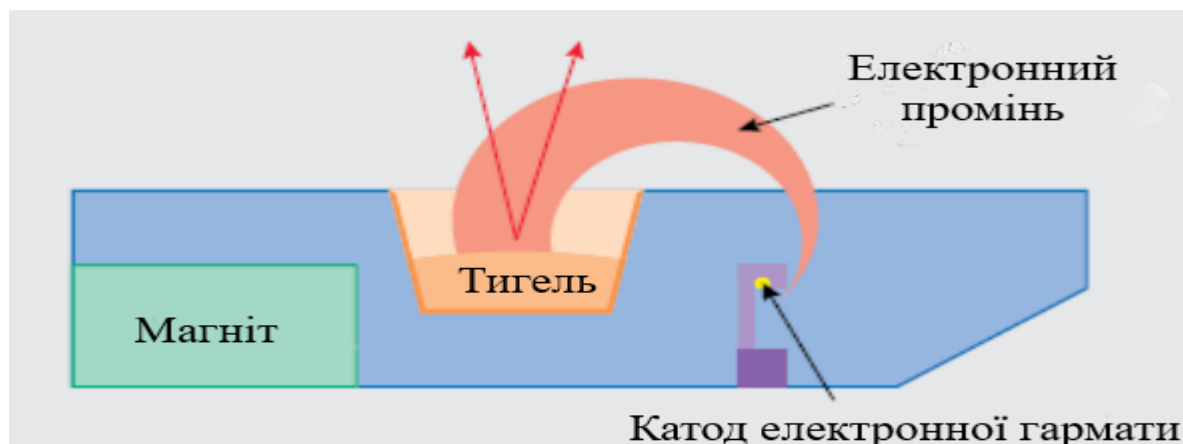


Рисунок 1.9 – Схема електронно-променевого випаровування

Переваги електронно-променевого випаровування обумовлені тим, що енергія підводиться безпосередньо до поверхні мішені, де формується потік пара. У зоні дії електронів може розвиватися температура до 10000°C . Завдяки цьому можливо отримувати плівки тугоплавких металів - танталу, молібдену та ін. При електронно-променевому випаровуванні крапельна фаза практично відсутня, так як нагрівається поверхня мішені. Особливістю даного методу є те, що підкладки не нагріваються в процесі випаровування, так як вони розташовуються на великій відстані від випарника (30-40 см).

Метод дозволяє варіювати швидкість осадження плівки від 1 нм до декількох мікрметрів в хвилину. Ефективність використання матеріалу мішені досить висока в порівнянні з іншими методами. Плівки, отримані за допомогою електронно-променевого випаровування, мають хорошу адгезію.

Даним методом отримують покриття із сплавів металів, напівпровідників і навіть діелектриків. При нанесенні плівок складного хімічного складу випаровування речовини проводиться в контрольованій газовій атмосфері.

Метод магнетронного розпилення широко застосовується для нанесення як різних промислово значущих покриттів [16], таких як декоративні, зносостійкі або захисні покриття товщиною кілька мікрметрів, так і для отримання складних, багат шарових оптичних конструкцій з товщиною шарів в кілька десятків нанометрів або електропровідних покриттів, властивості і структури яких магнетронні системи розпилення дозволяють задавати і варіювати в необхідних діапазонах [17].

Магнетронне розпилення характеризується високою повторюваністю і стабільністю осаджених покриттів як по швидкості розпилення, так і за характеристиками одержуваних плівок. Ця особливість магнетронних систем, на відміну, наприклад, від електронно-променевого випаровування, при добре підібраних і поставлених режимах нанесення окремих шарів, дозволяє отримувати досить складні багат шарові оптичні конструкції без систем

контролю товщини осадженого покриття. Крім цього одержувані покриття володіють низьким внутрішнім напруженням, що є істотним чинником при осадженні покриття на тонкі полімерні підкладки або скляні вироби, де потрібно зберегти високу якість оптичної поверхні. Завдяки високій енергетичній ефективності і ступеня іонізації магнетронне розпилення дозволяє домогтися отримання «щільних» шарів речовини, наприклад оксидів з високим показником заломлення, на холодній підкладці, що має істотне значення для матеріалів підкладок, які не допускають нагрівання [18].

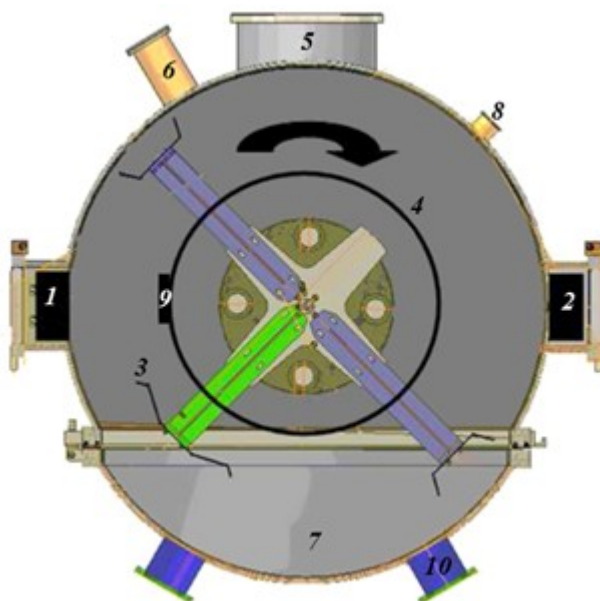


Рисунок 1.10 – Принципова схема установки УНП-900П:

1 - магнетрон; 2 - іонне джерело; 3 - заслінка; 4 - обертовий барабан; 5 - порт відкачки; 6 - клапан запуску повітря; 7 - кришка вакуумної камери; 8 - клапан подачі газу; 9 - підкладка, закріплена на барабані; 10 - оглядове вікно

При магнетронному розпиленні в магнетроні за допомогою електричного і магнітного полів плазма локалізується поблизу поверхні катода-мішені, що підвищує ефективність розпилення. Позитивні іони, що утворюються в розряді, прискорюються в напрямку катода, бомбардують його поверхню, вибиваючи частки матеріалу. Розпорошені частки мішені осідають у вигляді плівки на

підкладці, а також частково розсіюються на молекулах залишкових газів і осідають на стінках вакуумної камери [19]. Локалізація плазми поблизу катода дозволяє досягати великої щільності іонного струму при менших робочих тисках і, відповідно, забезпечувати високі швидкості розпилення.

Магнетронне розпилення проводять як на постійному (DC Sputtering), так і на змінному струмі (RF Sputtering). Розпилення на постійному струмі застосовують у разі провідних мішеней. У разі мішеней з непровідних матеріалів використовується розпорошення на змінному струмі, при якому знак заряду анода і катода змінюється з великою частотою (зазвичай 13.56 МГц), щоб уникнути поляризації мішені [20].

При *електродуговому нанесенні* випаровування металу здійснюється в зоні горіння дуги внаслідок ерозії електрода. Найбільш широке застосування знаходить дугове випаровування з холодного катода. Схема пристрою, за допомогою якого воно проводиться, представлена на рисунку 1.12.

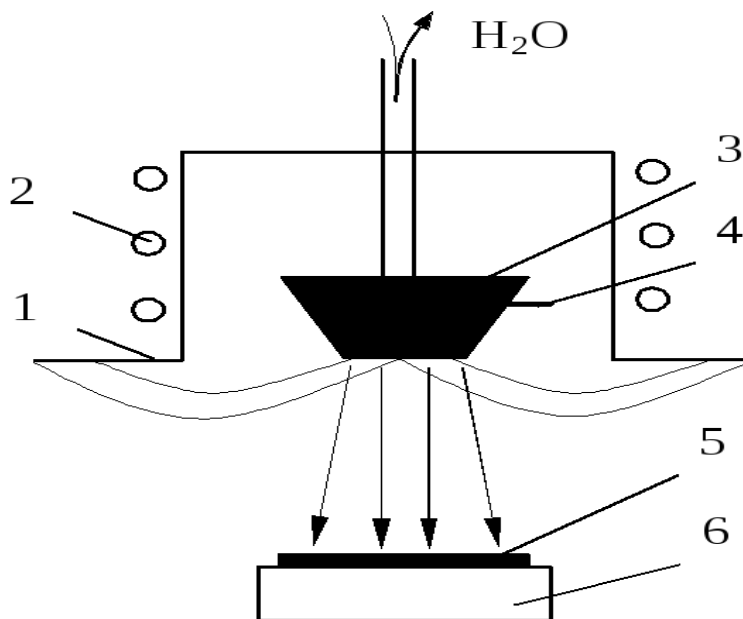


Рисунок 1.11 – Схема електродугового випаровування з магнітним утриманням катодних плям: 1-стінки камери (анод); 2-соленоїд; 3-катод; 4-підпалюючий електрод; 5-покриття; 6 - підкладка;

В даному методі використовується електрична дуга для випаровування матеріалу з мішені-катода, потім атоми з газової фази конденсуються на підкладці, утворюючи плівку. Осадження відбувається в високому вакуумі (до 10^{-8} Па). Метод застосовують для нанесення плівок металів, а також оксидів, нітридів та ін. реактивним електродуговим осадженням в атмосферах, що містять залишковий кисень (азот).

Процес випаровування здійснюється в зоні горіння дуги з малих ділянок поверхні катода, званих катодними плямами. Температура в області катодних плям досягає 15000°C , в результаті чого матеріал катода у вигляді атомів, іонів, розплавлених гранул (крапель) випаровується і рухається зі швидкістю до 10 км/с, залишаючи кратер на поверхні мішені. Розмір крапель варіюється від 1-10 мкм для тугоплавких катодів (вольфраму, молібдену, танталу і ін.) До 25-50 мкм при випаровуванні легкоплавких катодів.

Краплі в газовій фазі є одним із основних недоліків електродугового нанесення покриттів. Найбільш імовірною причиною утворення крапель є присутність в обсязі катода розчиненого газу, внаслідок чого при кипінні утворюються газові бульбашки, що інтенсивно виходять на поверхню і що призводять до розбризкування розплавлених макрочасток катода. При осажденні на підкладку краплі порушують однорідність плівки, погіршують її властивості. Для усунення крапель в газовій фазі застосовують сепарацію газового потоку в електричному або магнітному полях, використовують дегазуючі катоди, оптимізують режими випаровування.

Перевагами електродугового випаровування є можливість регулювання в широких межах швидкості нанесення плівок, можливість нанесення складних за хімічним складом покриттів (оксидів і ін.), Хороша адгезія і суцільність одержуваних плівок.

Електродугове осадження широко застосовується для нанесення на поверхню ріжучих інструментів зносостійких і захисних покриттів, значно

продовжують термін його служби. За допомогою даної технології може бути синтезований широкий спектр надтвердих і нанокompозитних покриттів, включаючи TiN, TiAlN, CrN, ZrN, AlCrTiN і TiAlSiN. Метод активно використовується для нанесення декоративного покриття, так, наприклад, покриття з TiN , що нагадує золото.

2. ЕКРАНУВАННЯ ЯК ЗАСІБ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ЕМС

2.1 Основні засади екранування електромагнітного поля

Під паразитною наводкою розуміється передача напруги з одного виробу або його частини в інший, не передбачена його схемою і конструкцією. Така наводка виникає внаслідок паразитного зв'язку між ними, зв'язок по електричних колам, які з'являтимуться в пристрої незалежно від бажання конструктора. Між двома електричними ланцюгами, що знаходяться на деякій відстані один від одного, можуть виникати електромагнітні зв'язки через: електричне поле; магнітне поле; електромагнітне поле; дроти і хвилеводи, що з'єднують ці ланцюги. Придушення паразитних наведень зводиться до усунення або послаблення до допустимих величин паразитних зв'язків між джерелами і приймачами наведень. В першу чергу це ослаблення повинно проводитися прямим зменшенням величин паразитних опорів. Способи такого зменшення елементарні: розміщення ймовірних джерел і приймачів наведення на максимально можливій відстані один від одного; правильна взаємна орієнтація їх деталей і контурів; зведення до мінімуму загальних опорів, які можуть виявитися в ланцюгах джерела і приймача; вилучення сторонніх проводів, які можуть зв'язати джерело і приймач і т. д. При недостатності всіх цих заходів доводиться вдаватися до екранування.

Екрануванням називається локалізація електромагнітної енергії в межах певного простору, що досягається шляхом запобігання розповсюдженню її всіма можливими способами. Для ясного розуміння цього формулювання уявімо собі (рис. 2.1) деякий високочастотний генератор, що живиться від мережі постійного або змінного струму. Очевидно, що цей генератор буде випромінювати в навколишній простір електромагнітну енергію. При цьому випромінюють

елементами можуть бути як окремі деталі самого генератора, так і ланцюг живлення.



Рисунок 2.1 – Випромінювання генератором ВЧ коливань

Екранування застосовується, коли потрібно захистити зовнішній стосовно генератора простір від електромагнітного поля, створюваного генератором. Так, в прикладі, зображеному на рис. 2.2, електромагнітна енергія обмежується за допомогою екрану, що складається з металевого кожуха і фільтруючого ланцюга. З цих екрануючих деталей перша перешкоджає поширенню енергії, випромінюваної безпосередньо деталями генератора, а друга - поширення енергії уздовж проводів живлення.



Рисунок 2.2 – Екранування ВЧ коливань

Таким чином, в поняття екран входять як деталі механічної конструкції: корпус, коробки, перегородки, так і електротехнічні деталі: дроселі, резистори, конденсатори, складові фільтруючого ланцюга тощо. Тільки спільна дія всіх цих деталей дає необхідний результат. Але не у всіх випадках потрібні всі види екрануючих деталей. Наприклад, якщо джерело і приймач сильно рознесені, то паразитний зв'язок між ними встановлюється в основному по дротах. У таких випадках достатньо включити в ці дроти одну або кілька розв'язуючих осередків, щоб отримати необхідне послаблення перешкоди, обійшовшись без механічних екрануючих деталей. [15].

Одним з основних видів радіоперешкод є електромагнітна хвиля перешкоди. Ця хвиля випромінюється джерелом перешкод так само, як і корисні радіохвилі, тобто в процесі випромінювання звільнюється енергія у формі, біжучої електромагнітної хвилі, що поширюється в просторі уздовж провідних поверхонь або уздовж проводів. Ця хвиля разом з корисними радіохвилями впливає на роботу радіочутливих обладнань. Очевидно, що в цьому випадку електромагнітна хвиля перешкод має досить високу несучу частоту й часто може бути додатково модульована по амплітуді або частоті низькочастотними періодичними або неперіодичними коливаннями й імпульсами. Таким чином, розглянутий спектр частот радіоперешкод є радіочастотним спектром.

Подібні радіоперешкоди, що поширюються в просторі та негативно впливають на роботу радіопристроїв, можуть характеризуватися цілком певною інтенсивністю. У цьому випадку завдання екранування зводиться до зменшення чи майже повного усунення електромагнітного поля радіоперешкод всередині замкненого об'єму екрана, у якому розташовуються весь радіопристрій або окремі його блоки, найбільш чутливі до дії перешкод, котрі заважають.

Часто завданням екранування може виявитися зменшення інтенсивності радіоперешкод у навколишньому просторі, створюваних при роботі електротехнічних і радіотехнічних обладнань, укладених в екрані. У цьому

випадку завдання екранування зводиться локалізації радіохвильових перешкод, у місці їх виникнення.

Обидва ці завдання часто формують, як завдання екранування від завадонесучих полів і їх розв'язок зв'язаний з усіма особливостями й закономірностями електромагнітних хвиль. До цього ж завдання примикає й екранування електромагнітних перешкод, створюваних окремими блоками або електричними колами, близько розташованими друг до друга. У таких випадках може йти мова про поля, створювані проводами, по яких протікає струм високої частоти.

Такий поділ завдань екранування від високочастотних перешкод звичайно робиться як з метою систематизації методів розв'язку завдання, так і в інтересах спрощення розрахунків екранів. Обидва ці завдання поєднуються тим, що при їхньому розв'язку в самому загальному випадку повинні бути застосовані електромагнітні екрани, що однаково добре захищають радіотехнічні обладнання від електричних і магнітних полів перешкод. У ряді випадків завдання екранування електричних і магнітних полів може бути розділеним. Такими випадками можуть бути ті, при яких одна зі складових полів не має вирішального значення для роботи обладнання, що екранується. Тоді можна роздільно розглядати дію й розрахунки електричних і магнітних екранів.

2.2 Електромагнітне поле і його характеристики

На практиці при характеристиці електромагнітної обстановки використовують терміни «електричне поле», «магнітне поле», «електромагнітне поле». Коротко пояснимо, що це означає і який зв'язок існує між ними. Електричне поле створюється зарядами. Наприклад, у всіх відомих шкільних дослідах з електризації ебоніту присутнє як раз електричне поле. Магнітне поле створюється при русі електричних зарядів по провіднику (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Електромагнітне поле

Для характеристики величини електричного поля використовується поняття напруженості електричного поля, позначене E , одиниця виміру В/м (Вольт-на-метр). Величина магнітного поля характеризується напруженістю магнітного поля H , одиниця А/м (Ампер-на-метр). При вимірі наднизьких і вкрай низьких частот часто також використовується поняття магнітної індукції B , одиниця Тл (Тесла), одна мільйонна частина Тл відповідає 1,25 А/м.

За визначенням, електромагнітне поле - це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється вплив між електричними зарядженими частинками. Фізичні причини існування електромагнітного поля пов'язані з тим, що змінюване в часі електричне поле E породжує магнітне поле H , а змінюване H - вихрове електричне поле: обидва компоненти E і H , безперервно змінюючись, збуджують один одного. Електромагнітне поле (ЕМП) нерухомих або рівномірно рухомих заряджених частинок нерозривно пов'язане з цими частками. При прискореному русі заряджених частинок ЕМП «відривається» від них і існує незалежно у формі електромагнітних хвиль, зникаючи з усуненням джерела (наприклад, радіохвилі не зникають і за відсутності струму в антені).

Електромагнітні хвилі характеризуються довжиною хвилі, позначення - λ (лямбда). Джерело, що генерує випромінювання, а по суті створює електромагнітні коливання, характеризується частотою – f .

Електромагнітне поле проявляє себе у вигляді силової дії на електричні заряди. Його прийнято характеризувати силою, з якої воно діє на точковий позитивний заряд, що рухається (Лоренцева сила):

$$F_{em} = qE + q[v, B] = F_e + F_m, \quad (2.1)$$

Лоренцева сила розкладається на дві: електричну $F_e = qE$ і магнітну $F_m = q[v, B]$.

Сила дії електромагнітного поля на заряд залежить від середовища. Фізично це пояснюється поляризацією й намагнічуванням середовища, у результаті яких з'являються додаткові електричні й магнітні поля, що накладаються на основні.

Тому наявність векторних величин E і B , що цілком визначають електромагнітне поле у вакуумі, недостатньо у випадку опису поля в довільному середовищі. Для опису електромагнітного поля в матеріальних середовищах додатково вводяться вектор електричного зсуву (електричної індукції) D і вектор напруженості магнітного поля H . Крім того, для середовищ із вільними електричними зарядами вводиться вектор щільності струму провідності J_{np} . Зв'язок між цими векторами й векторами E та B визначається матеріальними рівняннями.

Вектор електричного зсуву рівний (перше матеріальне рівняння)

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E, \quad (2.2)$$

де ε — абсолютна діелектрична проникність середовища; $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — електрична постійна (діелектрична проникність вакууму); ε_r — відносна діелектрична проникність.

Вектор напруженості магнітного поля (друге матеріальне рівняння)

$$H = B / \mu = B / \mu_0 \mu_r, \quad (2.3)$$

де μ — абсолютна магнітна проникність; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнітна постійна;

μ_r — відносна магнітна проникність.

Вектор щільності струму провідності (третє матеріальне рівняння)

$$J_{np} = \sigma E, \quad (2.4)$$

де σ — об'ємна питома провідність середовища.

При дослідженнях часто користуються поняттям комплексної діелектричної проникності середовища:

$$\varepsilon_{\kappa} = \varepsilon - i\sigma/\omega, \quad (2.5)$$

Дійсна частина комплексної діелектричної проникності ε визначає інтенсивність поляризації середовища, а уявна σ/ω характеризує втрати в середовищі. Комплексна діелектрична проникність може бути представлена векторною діаграмою рис. 2.4.

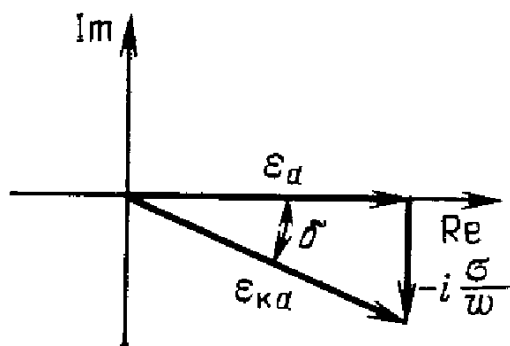


Рисунок 2.4 – Комплексна діелектрична проникність.

2.3 Особливості ближнього і дальнього полів

Ряд важливих питань проектування системи екранування базується на знаннях структури електромагнітного поля. Електродинамічний розгляд даного завдання дає його опис у всій повноті. Але для багатьох практичних випадків рішення досить складні або взагалі не можуть бути отримані. Певні обґрунтовані спрощення з цілком прийнятним результатом для інженерної практики істотно полегшують рішення поставленого завдання. Подібні спрощення вводяться при розробці систем екранування. Для їх обґрунтування необхідно розглянути елементи теорії поширення електромагнітних хвиль.

Поширюються електромагнітні хвилі мають дві компоненти у вигляді вектору E напруженості електричного поля (В/м) і вектору H напруженості магнітного поля (А/м). Вони ортогональні і знаходяться в одній площині, нормаль до якої визначає напрямок поширення електромагнітної хвилі.

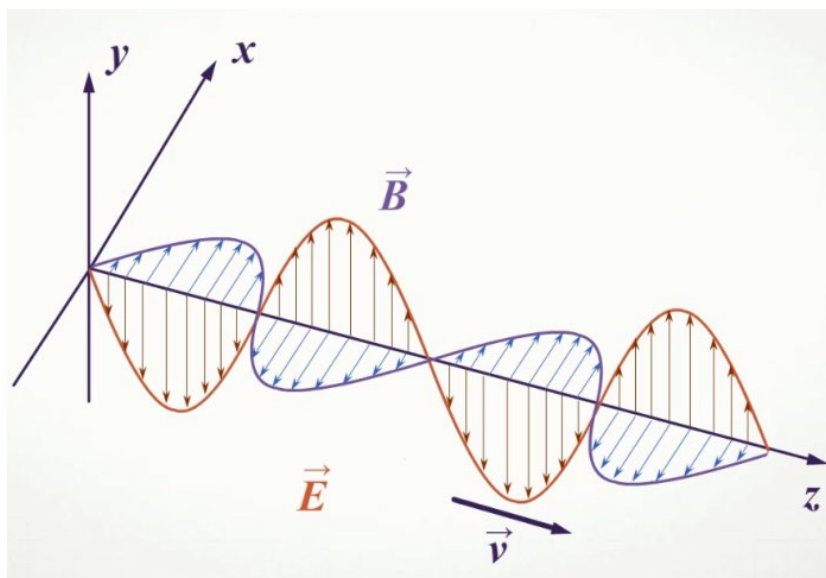


Рисунок 2.5 – Структура електромагнітної хвилі

Параметри електромагнітного поля характеризуються властивостями джерела випромінювання, середовищем навколо джерела і шляхом поширення хвилі, а також відстанню між джерелом і точкою спостереження хвилі. Співвідношення між напруженням E електричного поля і H магнітного поля визначає хвильовий опір Z середовища поширення:

$$Z = E / H, \text{ Ом} \quad (2.6)$$

У безпосередній близькості від джерела електромагнітне поле характеризується внутрішніми властивостями джерела. Джерела з високим хвильовим опором можуть бути представлені у вигляді електричного диполя. В околиці цього диполя формуються інтенсивне електричне поле і слабе магнітне поле, чому відповідає дуже високий (приблизно 3000 Ом) хвильовий опір середовища в безпосередній близькості від диполя.

Джерела перешкод, модель яких представлена у вигляді струмової петлі (магнітного диполя), створюють інтенсивне магнітне поле і слабе електричне в

безпосередній близькості від джерела. Це визначає згідно (2.6) досить малий хвильовий опір середовища в околицях джерела (приблизно 30 Ом).

Високий і низький хвильовий опір середовища характерний тільки в безпосередній близькості від джерела перешкод. У міру віддалення від джерела хвильовий опір Z середовища прагне до хвильового опору вільного простору 377 Ом, що відповідає режиму поширення плоскої електромагнітної хвилі. Прийнято вважати що при відстані від джерела, що дорівнює $\lambda/2\pi$, де λ - довжина хвилі синусоїдального коливання, плоска електромагнітна хвиля повністю сформована і хвильовий опір для неї становить 377 Ом. На рисунку (2.6) показана межа, після якої можна говорити про формування плоскої електромагнітної хвилі.

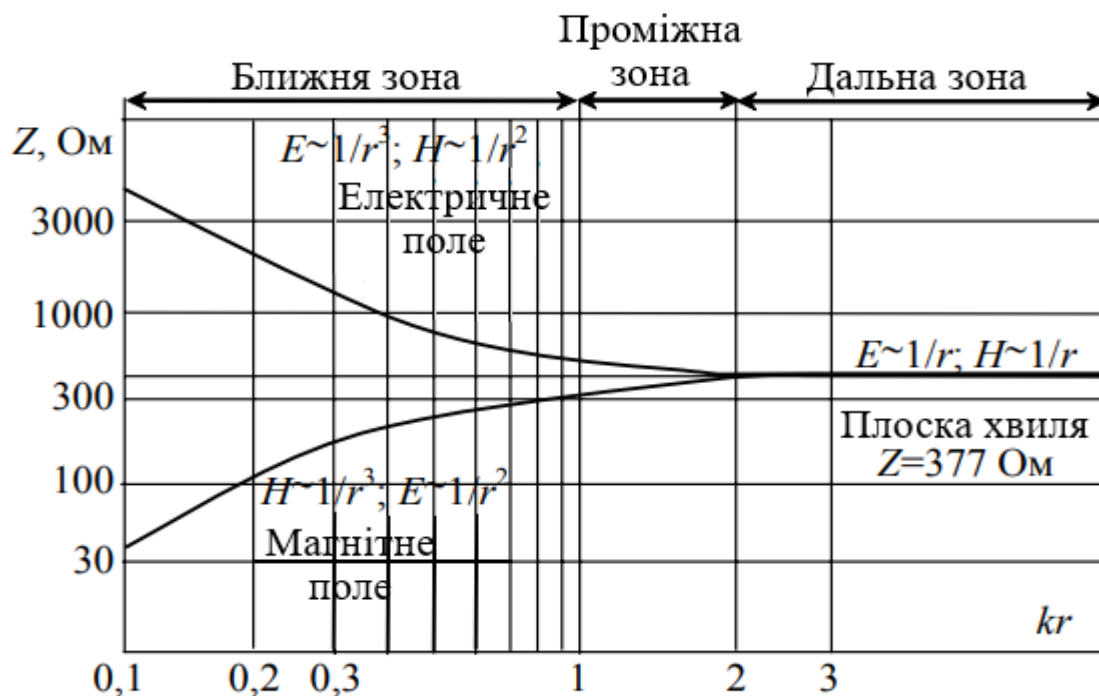


Рисунок 2.6 – Зміна хвильового опору середовища при віддаленні від джерела випромінювання

Наявність такої межі дозволяє розділити всю область поширення електромагнітних хвиль на дві зони:

- ближню, що охоплює область від джерела до кордону, що розташовується на відстані $\lambda / 2\pi$;
- дальню, що простягається від кордону $\lambda / 2\pi$ до нескінченності.

Очевидно, що ніякого різкого переходу між зонами бути не може. Тому завжди має місце деяка перехідна зона формування плоскої електромагнітної хвилі.

Для виділених зон характерні наступні особливості.

У ближній зоні переважно діє механізм індукції з досить чітким поділом на магнітну і електричну складові, що вимагає окремого розгляду електричного і магнітного екранування. При наявності індукції джерело і рецептор пов'язані силовими лініями, і завдання екранування полягає в перехопленні цих ліній і замиканні на заземлені елементи конструкції (для електричного поля) або в направленні їх в сторону від рецепторів (магнітне поле).

Інтенсивності основної компоненти в ближній зоні зменшується обернено пропорційно кубу відстані від джерела, а інші компоненти - обернено пропорційно квадрату відстані.

Перехідна зона - зона формування плоскої електромагнітної хвилі.

У дальній зоні поширюється плоска електромагнітна хвиля (Т-хвиля). Електромагнітне поле відривається від джерела і поширюється в просторі з постійним хвильовим опором. Тому в дальній зоні поле буде абсолютно однаково за своєю структурою (співвідношення між E і H) для будь-якого джерела. Це, до речі, надає однозначності результатам вимірювань на завадоемісію, які проводяться при розташуванні антен в дальній зоні.

Інтенсивності електричної і магнітної компонент поля в дальній зоні зменшується обернено пропорційно віддаленню від джерела.

На жаль, тип джерела відомий тільки в окремих випадках (наприклад, трансформатор як джерело магнітного поля). Тому, екранування в ближній зоні вимагає апріорних знань властивостей джерела. Очевидно, що для далекої зони

тип джерела не має значення, оскільки в будь-якому випадку впливаюче поле буде являти собою плоску електромагнітну хвилю.

Особливості екранування в ближній зоні

Якщо сигнал гармонійний з певною частотою f , то для нього може бути визначена довжина хвилі $\lambda = v c / f$, де $v c$ - швидкість світла у вільному просторі. При імпульсному сигналі довжина хвилі розраховується для високочастотних складових спектра сигналу. Максимальну проникаючу здатність через апертури мають найбільш високочастотні складові спектра сигналу. Максимальна спектральна складова визначає мінімальну довжину хвилі і, отже, мінімальна відстань, на якому розташована перехідна зона між ближньою і дальньою зонами. Для інших, менш високочастотних, складових цей кордон буде віддалений від джерела електромагнітних збурень. Таким чином, при довільному сигналі і фіксованій відстані між джерелом і рецептором перешкод останній може для одних частот перебувати в ближній зоні, а інших - в дальній.

Для виділених зон, як зазначалося раніше, характерні наступні особливості. У ближній зоні переважно діє механізм індукції з домінантним ефектом магнітної або електричної складової, що вимагає окремого розгляду електричного або магнітного екранування.

Дальня зона - зона дії плоскої електромагнітної хвилі, для якої слід розглядати електромагнітне екранування.

Таким чином, при аналізі екранування необхідно розділяти завдання екранування електричного, магнітного та електромагнітного полів. У ближній зоні, оскільки відстань від джерела до кордону менше довжини хвилі, процеси визначаються в квазістатичному наближенні. У дальній зоні процеси більш складні і вимагають електродинамічного аналізу. Беручи до уваги спектральний склад інформаційних сигналів і електромагнітних впливів, при проектуванні екранів в ряді випадків доводиться враховувати особливості їх роботи як в

дальній зоні, так і в ближній, орієнтуючись на властивості джерела випромінювань.

Структура поля в ближній зоні залежить від типу джерела випромінювань. На жаль, він відомий тільки в окремих випадках. Тому розробка екранів для апаратури, що працює в ближній зоні, потребує ретельного аналізу типу джерела. При цьому методи і способи екранування для електричного поля будуть принципово відрізнятися від засобів екранування магнітного поля.

2.4 Ефективність екранування

Ефективність екранування в ближньому і дальньому полях можна визначити двома методами. Перший базується на співвідношеннях теорії електричних кіл, другий – на співвідношеннях теорії електромагнітного поля. В першій ситуації аналізують поля, які наводять у екранах вихрові струми (струми Фуко), які в свою чергу, створюють вторинне поле, та нейтралізують первинне поле у певних областях простору. Надалі застосовуємо другий підхід – заснований на теорії електромагнітного поля.

Ефективність екранування визначають, як створене екраном притуплення напруженостей електричних, магнітних полів, тобто складових електромагнітного поля, відповідно

$$K^E = 20 \lg \frac{E_0}{E_1} \text{ [дБ]}, \quad (2.7)$$

$$K^H = 20 \lg \frac{H_0}{H_1} \text{ [дБ]}, \quad (2.8)$$

де K^E , K^H – відповідно коефіцієнти ефективності екранування,

$E_0(H_0)$ – напруженість відповідних складових електромагнітного поля перед екраном,

$E_1(H_1)$ – напруженість відповідних складових електромагнітного поля за екраном.

Ефективність екрана визначають такі фактори:

- частота;
- матеріал та його товщина;
- конфігурація;
- напрям поширення поля;
- поляризація, тощо.

Для електромагнітної хвилі, яка падає на металеву поверхню, існує два види втрат. Хвиля частково відбивається від поверхні, а заломлена хвиля, яка поширюється у середовищі, згасає внаслідок поглинання.

Тобто явище, яке має назву втрати поглинання, однакове для ближнього і дальнього електричного та магнітного полів. На відміну від втрат на поглинання втрати відбиття залежать від характеру поля і відношення E/H .

3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНУВАННЯ ОДНАЩОРОВИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЕКРАНОМ

3.1 Основні розрахункові співвідношення

3.1.1 Втрати в екранах на поглинання

Складники електромагнітного поля в середовищі згасають за законом:

$$E_1 = E_0 e^{-\alpha d}, \quad (3.1)$$

$$H_1 = H_0 e^{-\alpha d}, \quad (3.2)$$

де E_1 , H_1 – напруженість хвилі на відстані d від поверхні екрану (рис. 3.1),

α – коефіцієнт згасання,

E_0 , H_0 – напруженість хвилі біля поверхні.

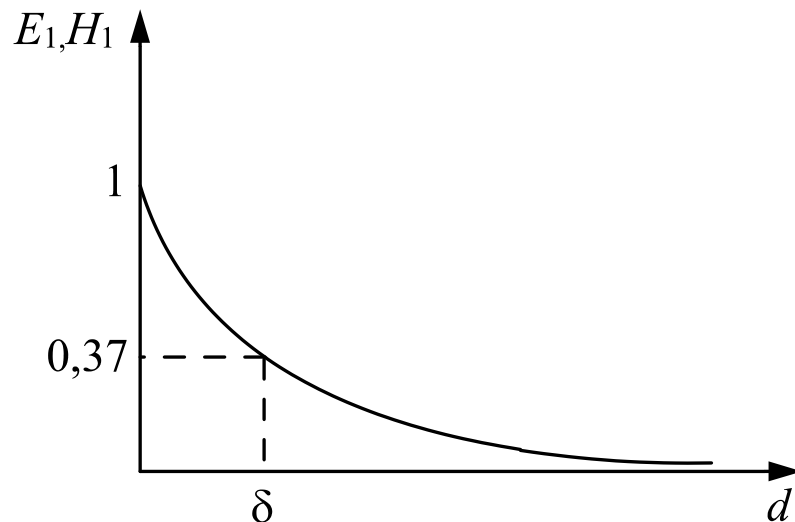


Рисунок 3.1 – Залежність згасання E від товщини матеріалу

Відстань, на якій хвиля згасає в e раз від первинного значення, визначають як глибину проникнення:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}, \quad (3.3)$$

або із застосуванням відносних величин:

$$\delta = \frac{66,7}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}}. \quad (3.4)$$

У табл. 3.1 наведено значення глибини проникнення для міді, алюмінію та сталі залежно від частоти.

Таблиця 3.1 – Глибина проникнення для деяких матеріалів

Частота	Глибина проникнення, мм		
	мідь	алюміній	сталь
100 Гц	6,6	8,5	0,66
1 кГц	2,1	2,7	0,203
10 кГц	0,66	0,84	0,076
100 кГц	0,203	0,279	0,020
1 МГц	0,066	0,084	0,0076
10 МГц	0,020	0,025	0,0020

Таким чином втрати внаслідок поглинання в екрані записують як:

$$K_{\text{погл}} = 20 \frac{d}{\delta} \lg e \text{ [дБ]}, \quad (3.5)$$

або:

$$K_{\text{погл}} = 8,69 \frac{d}{\delta} \text{ [дБ]}. \quad (3.6)$$

де d – товщина екрану.

Ефективність екранування внаслідок поглинання однакова для магнітного поля, електричного поля і плоскої хвилі.

Підставимо рівняння (2.13) у (2.15) та отримаємо коефіцієнт ефективності екранування внаслідок втрат на поглинання:

$$K_{\text{погл}} = 0,131d\sqrt{f\sigma_r}, \quad (3.7)$$

де d – товщина екрану в міліметрах;

σ_r – відносна питома провідність $\sigma_r = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{Cu}}}$;

$\sigma_{\text{Cu}} = 5,7 \cdot 10^7$ См/м – питома провідність міді;

μ_r – відносна магнітна проникність.

Коефіцієнт поглинання для сталі та міді залежно від частоти наведено на рис. 3.2.

Тонкий лист міді (0,5 мм) забезпечує суттєві втрати на поглинання (66 дБ) на частоті 1 МГц, але майже не вносить втрат на частоті нижче 1 кГц. Сталь забезпечує більше поглинання, ніж мідь. Однак, якщо застосовувати сталь для забезпечення значного поглинання на частотах порядку 1 кГц, необхідно застосовувати матеріал з більшим значенням d .

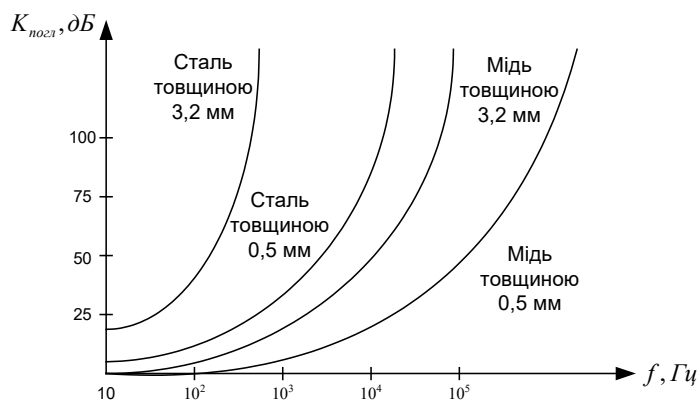


Рисунок 3.2 – Коефіцієнт екранування внаслідок поглинання для сталі та міді залежно від частоти

3.1.2 Втрати в екранах в наслідок відбиття

Втрати внаслідок явища відбиття електромагнітної хвилі на межі розділу двох середовищ обумовлені різними значеннями параметрів середовищ (ϵ, μ, σ), які визначають співвідношення E/H . На рисунках і в формулах маємо на увазі модулі відповідних величин.

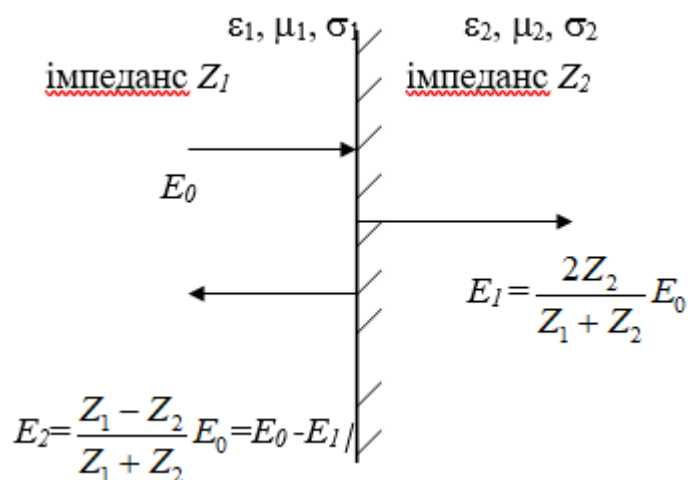


Рисунок 3.3 – До пояснення процесу відбиття та проходження хвилі за умови нормального падіння

E_1 – напруженість заломленої, а E_2 – відбитої хвилі.

Напруженості поля електромагнітної хвилі, що пройшла від середовища з опором Z_1 у середовище з опором Z_2 , визначають формули:

$$E_1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E_0, \quad (3.8)$$

$$H_1 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} H_0, \quad (3.9)$$

де E_0 , H_0 – напруженість електричної і магнітної складової хвилі, що падає,

E_1 , H_1 – напруженість електричної і магнітної складової заломленої хвилі (що пройшла).

В процесі проходження крізь екран хвиля має дві границі розділу (рис. 3.4). Тому результативні складові поля (захищеної зони):

$$E_P = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} E_0, \quad (3.10)$$

$$H_P = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} H_0. \quad (3.11)$$

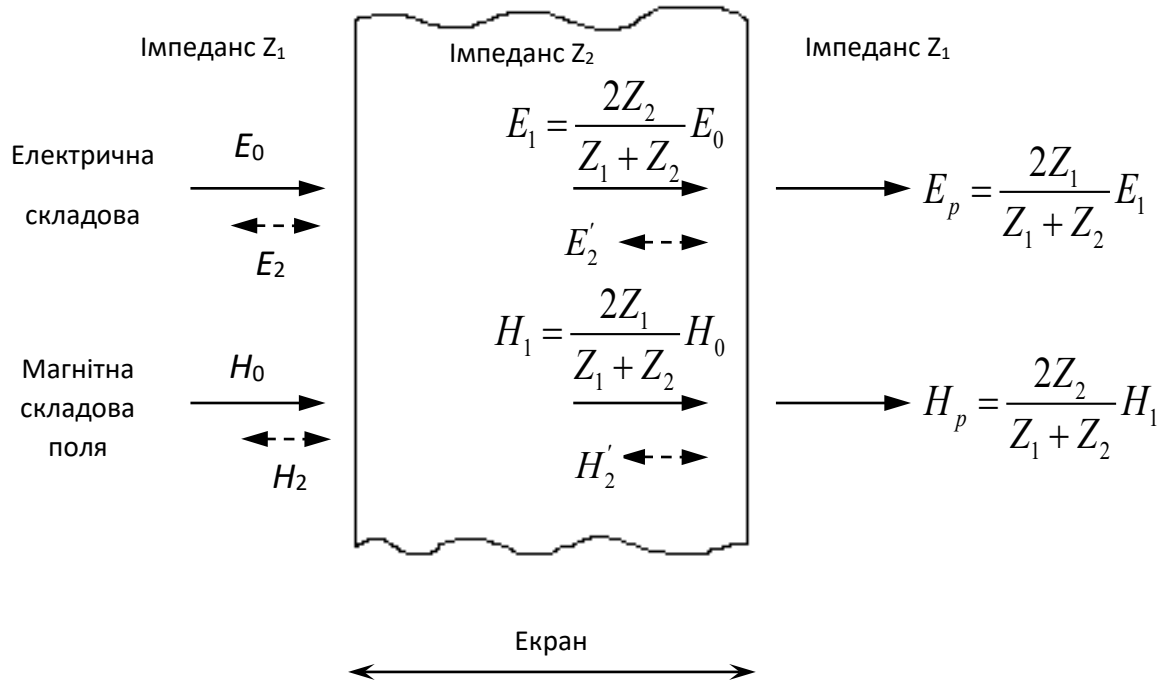


Рисунок 3.4 – Процес проходження складових електромагнітного поля крізь екран

Імпеданси Z_1 і Z_2 мають різні значення, й за умови $Z_1 \gg Z_2$:

$$E_3 = 4 \frac{Z_2}{Z_1} E_0, \quad (3.12)$$

$$H_3 = 4 \frac{Z_2}{Z_1} H_0. \quad (3.13)$$

Узагальнено – за умови $Z_1 \gg Z_2$ коефіцієнт ефективності екранування внаслідок відбиття:

$$K_{\text{відб}} = 20 \lg \frac{Z_1}{4Z_2}, \quad (3.14)$$

де Z_1 – модуль імпедансу навколишнього середовища (Z_w);

Z_2 – модуль імпедансу екрану (Z_c),

Ефект багатократного екранування призводить до несуттєвого зниження ефективності екрана, тому за умови $K_{\text{пол}} > 10$ дБ його не враховують.

3.2 Аналітичний метод розрахунку ефективності електромагнітного екранування

Аналітичний метод розрахунку ефективності електромагнітного екранування заснований на вирішенні рівнянь Максвелла для гармонійних коливань:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{H} &= (\sigma + i\omega\epsilon)\dot{E}, \\ \operatorname{rot} \dot{E} &= -j\omega\mu\dot{H} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Розглянемо ефективність екранування однорідного плоского екрана при нормальному падінні на нього плоскої електромагнітної хвилі вздовж осі y (рис. 3.5).

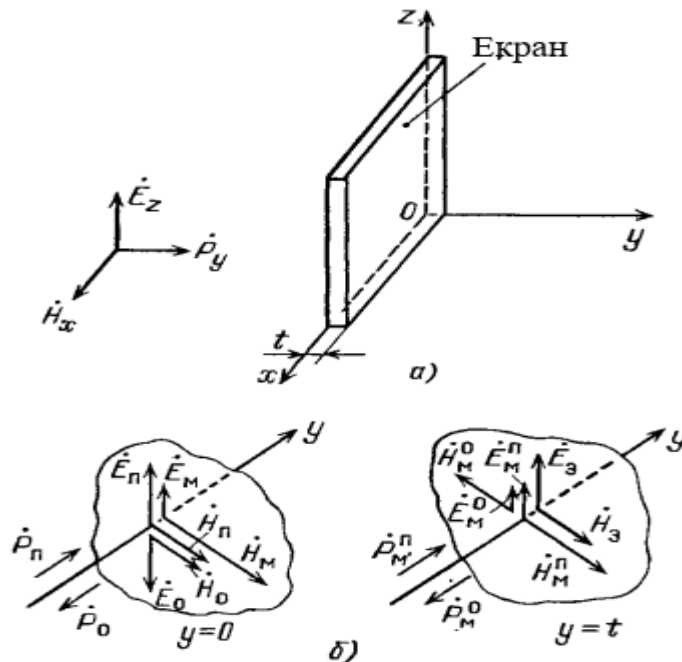


Рисунок 3.5 – Падіння плоскої електромагнітної хвилі на плоский екран
(а) і її відбивання і переломлення на границі (б)

Слід зазначити, що з точки зору екранування випадок нормального падіння плоскої електромагнітної хвилі є найбільш несприятливим. При похилому падінні електромагнітна хвиля часто відбивається від металічної стінки екрану, частково проникає через неї, продовжуючи поширюватися в перпендикулярному стосовно стінки екрану напрямку.

Вказані явища підпорядковуються закону Снелля, відповідного до якого кут відбивання рівний куту падіння і при будь-яких кутах падіння на границю щільного середовища (металічна стінка) переломлена хвиля практично поширюється в напрямлені нормалі границі.

Розрахунок зводиться до визначення складових електромагнітного поля, що проникли в екрановану область простору ($y \geq t$), при відомих параметрах поля (\dot{E} , \dot{H}), електрофізичних, а також геометричних параметрів екрану (μ, σ, t) і електрофізичних параметрах середовища (μ_0, ϵ_0).

Для розглянутого випадку основні рівняння електродинаміки (3.14) приймуть вид

$$\begin{aligned}\frac{d\dot{H}_x}{dy} &= -(\sigma + i\omega\epsilon)\dot{E}_z, \\ \frac{d\dot{E}_z}{dy} &= -j\omega\mu\dot{H}_x\end{aligned}\tag{3.15}$$

Вирішимо систему рівнянь (3.15) для діелектрика (повітря) і металевого екрана і визначимо характеристичні опори цих середовищ.

Для діелектрика області джерела перешкод ($\sigma = 0$) при вирішенні системи рівнянь (3.15) щодо \dot{E} отримаємо хвильове рівняння

$$\frac{d^2\dot{E}_z}{dy^2} - \gamma^2\dot{E}_z = 0,\tag{3.16}$$

де $\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ -коефіцієнт поширення хвилі в повітряному середовищі , або хвильове число.

Рішення диференційного рівняння має вигляд

$$\dot{E}_z = Ae^{\gamma y} + Be^{-\gamma y}, \quad (3.17)$$

З урахування виразу (3.17) згідно з (3.15) магнітне поле

$$\dot{H}_x = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{d\dot{E}_z}{dy} = -\frac{\gamma}{j\omega\mu_0} (Ae^{\gamma y} - Be^{-\gamma y}), \quad (3.18)$$

В виразах (3.17) і (3.18) перші складові характеризують відбиту хвилю, а другі – падаючу. Характеристичний опір діелектрика для падаючої і відбитої від екрана електромагнітної хвилі відповідно

$$\begin{aligned} Z_{\text{ДП}}^{\text{T}} &= \dot{E}_z^{\text{T}} / \dot{H}_x^{\text{T}} = \frac{Be^{-\gamma y}}{\gamma Be^{-\gamma y} / j\omega\mu_0} = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}, \\ Z_{\text{ДП}}^{\text{B}} &= \dot{E}_z^{\text{B}} / \dot{H}_x^{\text{B}} = -\sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Отже, характеристичний опір діелектрика для падаючої і відбитої хвиль однакові за абсолютним значенням і відрізняються знаками, що свідчить про їх зустрічний рух. Згідно (3.19) вакуум має характеристичний опір $Z_{\text{ДП}}^{\text{T}} = 120\pi = 377 \text{ Ом}$.

Струми зміщення в металі набагато менше струмів провідності, так як $\sigma \gg \omega\varepsilon$. У зв'язку з цим для металевого екрана згідно (3.15) хвильове рівняння матиме вигляд

$$\frac{d^2 \dot{E}_z}{dy^2} - k^2 \dot{E}_z = 0, \quad (3.20)$$

де k - коефіцієнт поширення хвилі в металі, або хвильове число $k = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1 + j)\sqrt{\omega\mu\sigma/2}$.

Аналогічно (3.17) і (3.18) рішення цього диференціального рівняння

$$\dot{E}_z = Ce^{ky} + De^{-ky}, \quad (3.21)$$

$$\dot{H}_x = -\frac{k}{j\omega\mu_0}(Ce^{ky} - De^{-ky}) \quad (3.22)$$

Характеристичний опір металу для падаючої і відбитої хвилі відповідно

$$\begin{aligned} Z_M^T &= \dot{E}_z^n / \dot{H}_x^n = \sqrt{j\omega\mu/\sigma}, \\ Z_M^B &= \dot{E}_z^B / \dot{H}_x^B = -\sqrt{j\omega\mu/\sigma} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Отже, в металі екрану так само, як і в діелектрику в області джерела перешкод, має місце зустрічний рух падаючої і відбитої хвиль, характеристичний опір яких однаковий за абсолютним значенням.

Таким чином, внаслідок реакції екрана частина енергії відбивається від його поверхні і прямує назад в бік джерела збудження завадонесучого електромагнітного поля.

Висловимо коефіцієнти екранування \dot{K}_e і реакції екрана \dot{P} :

$$\begin{aligned} \dot{K}_e &= \dot{E}_z^e|_{y \geq t} / \dot{E}_z^n|_{y \leq 0} = \dot{H}_x^e|_{y \geq t} / \dot{H}_x^n|_{y \leq 0}, \\ \dot{P} &= \dot{E}_z^e|_{y \leq 0} / \dot{E}_z^n|_{y \leq 0} = \dot{H}_x^e|_{y \leq 0} / \dot{H}_x^n|_{y \leq 0} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Далі спільно вирішимо рівняння (3.17), (3.18), (3.21) і (3.22) щодо \dot{K}_e , \dot{P} і постійних інтегрування A, B, C, D , використавши умову безперервності тангенціальних складових на кордоні розділу середовищ діелектрик - екран і екран - діелектрик .

Позначивши складові поля, які проникають в товщу металу, \dot{E}_z^M , \dot{H}_x^M , запишемо граничні умови при $y = 0$

$$\begin{aligned}\dot{E}_z^{\Pi} - \dot{E}_z^{\text{В}} &= \dot{E}_z^M, \\ \dot{H}_x^{\Pi} - \dot{H}_x^{\text{В}} &= \dot{H}_x^M;\end{aligned}\tag{3.25}$$

при $y = t$

$$\begin{aligned}\dot{E}_z^{\text{е}} &= \dot{E}_z^M \\ \dot{H}_x^{\text{е}} &= \dot{H}_x^M\end{aligned}\tag{3.26}$$

Підставивши (3.25), (3.26) в вирази (3.21), (3.22) з урахування (3.24) отримаємо:

$$\begin{aligned}\left. \begin{aligned}\dot{E}_z^{\Pi}(1 - \dot{P}) &= C e^{ky} + D e^{-ky}, \\ \dot{H}_x^{\Pi}(1 + \dot{P}) &= \left(-\frac{k}{j\omega\mu}\right)(C e^{ky} - D e^{-ky}),\end{aligned} \right\} y = 0 \\ \left. \begin{aligned}\dot{E}_z^{\text{е}}\dot{K}_{\text{е}} &= C e^{ky} + D e^{-ky}, \\ \dot{H}_x^{\text{е}}\dot{K}_{\text{е}} &= \left(-\frac{k}{j\omega\mu}\right)(C e^{ky} - D e^{-ky}),\end{aligned} \right\} y = t\end{aligned}\tag{3.27}$$

Електричні і магнітні складові пов'язані між собою через характеристичні опори середовищ діелектрика і металу. Тому систему рівнянь з урахуванням (3.19) і (3.23) можна привести до електричного (або магнітного) поля

$$\begin{aligned}\left. \begin{aligned}\dot{E}_z^{\Pi}(1 - \dot{P}) &= C + D, \\ \dot{H}_x^{\Pi}(1 - \dot{P}) &= \left(-\frac{Z_{\text{Д}}}{Z_{\text{М}}}\right)(C - D),\end{aligned} \right\} y = 0 \\ \left. \begin{aligned}\dot{E}_z^{\text{е}}\dot{K}_{\text{е}} &= C e^{kt} + D e^{-kt}, \\ \dot{H}_x^{\text{е}}\dot{K}_{\text{е}} &= \left(-\frac{Z_{\text{Д}}}{Z_{\text{М}}}\right)(C e^{kt} - D e^{-kt}),\end{aligned} \right\} y = t\end{aligned}\tag{3.28}$$

Після спільного рішення системи рівнянь (чотири рівняння з чотирма невідомими) і переходу до гіперболічних функцій отримаємо вираз для розрахунку коефіцієнта екранування:

$$K_e = 1 / \left\{ \cosh kt \left[1 + 0.5 \left(\frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \tanh kt \right] \right\} \quad (3.29)$$

Коефіцієнт реакції екрану при цьому визначається як:

$$\dot{P} = 0.5 \left(\frac{Z_D}{Z_M} - \frac{Z_M}{Z_D} \right) \tanh kt / \left[1 + 0.5 \left(\frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \tanh kt \right] \quad (3.30)$$

Згідно виразу (3.29) ефективність екранування, дБ

$$S = 20 \lg \left| \cosh kt \left[1 + 0.5 \left(\frac{Z_D}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_D} \right) \tanh kt \right] \right| \quad (3.31)$$

Слід зазначити, що вирази (3.29), (3.30) для аналізу характеристик екранування отримані на підставі рівнянь електродинаміки і тому носять універсальний характер. При аналізі ефективності екранування магнітного і електричного полів (ближня зона) змінюються характеристичні опори діелектрика, що входять в ці вирази. Визначимо ці вирази, маючи на увазі, що в ближній зоні відстань від джерела поля до екрану набагато менше довжини хвилі, $(r \ll \frac{\lambda}{2\pi})$. Це дозволяє розглядати електромагнітні явища в ближній зоні як квазістаціонарні, тобто вони протікають досить повільно.

Магнітне поле. У ближній зоні джерела перешкод виходячи з умови квазістаціонарності можна вважати, що магнітне поле є безвихровим, або потенційним. Тоді уявімо вихідні рівняння (3.14) у вигляді

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \dot{E} &= -j\omega\mu_0\dot{H} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Згідно з (3.32) маємо диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 \dot{E}_z}{dy^2} = 0 \quad (3.33)$$

рішення якого має вигляд

$$\dot{E}_z = C_1 y + C_2 \quad (3.34)$$

Оскільки $\dot{E}_z = 0$ при $y = 0$, отже, $C_2 = 0$ і

$$\dot{E}_z = C_1 y \quad (3.35)$$

Магнітне поле в розглянутій області постійне і з урахуванням виразів (3.18) і (3.34)

$$\dot{H}_x = -C_1 / j\omega\mu_0 \quad (3.36)$$

Згідно з виразами (3.35) і (3.36) характеристичний опір повітряного діелектрика магнітному полю визначається як

$$Z_{\text{д}}^H = \frac{\dot{E}_z}{\dot{H}_x} = -j\omega\mu_0 y \quad (3.37)$$

Отже, в ближній зоні характеристичний опір діелектрика магнітному полю прямо пропорційний частоті джерела і віддалі від нього.

Електричне поле. У ближній зоні джерело створює безвихрове (потенційне) електричне поле, і рівняння електродинаміки (3.15) записуються у вигляді

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{H} &= i\omega\varepsilon_0\dot{E}, \\ \operatorname{rot} \dot{E} &= 0 \end{aligned} \quad (3.38)$$

Згідно (3.38) отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 \dot{H}_x}{dy^2} = 0 \quad (3.39)$$

рішення якого має вигляд

$$\dot{H}_x = C_1 y \quad (3.40)$$

Електричне поле з урахуванням виразу (3.18)

$$\dot{E}_z = C_1 / j\omega\varepsilon_0 \quad (3.41)$$

Характеристичний опір повітряного діелектрика джерела електричного поля перешкод згідно (3.40) і (3.41) визначається як

$$Z_{\text{Д}}^H = \frac{1}{j\omega\varepsilon_0 y} \quad (3.42)$$

тобто в ближній зоні характеристичний опір діелектрика електричного поля обернено пропорційний частоті джерела і віддалі від нього.

Аналіз ефективності електромагнітного екранування. Розрахункову формулу ефективності електромагнітного екранування, дБ, представимо у вигляді

$$S = A + R + B, \quad (3.43)$$

де A - загасання за рахунок поглинання, викликане тепловими втратами від порушуваних вихрових струмів в металі, $A = 9,69|k|t/\sqrt{2}$.

R - затухання за рахунок відбиття електромагнітної енергії від кордонів розділу діелектрик - екран і екран - діелектрик для основної хвилі $R = 20 \lg |(Z_D + Z_M)^2 / 4Z_D Z_M|$.

B - загасання електромагнітної енергії за рахунок багаторазових згасаючих внутрішніх перевідбиттів в стінці екрану для інших складових хвиль, $B = 20 \lg \left| 1 - \left| \frac{Z_D - Z_M}{Z_D + Z_M} \right|^2 \exp(-2kt) \right|$.

При розрахунках електромагнітного екранування зазвичай користуються модулями значень комплексних параметрів: $|k| = \sqrt{\omega\mu\sigma}$, $|Z_M| = \sqrt{\omega\mu/\sigma}$. Залежно від виду джерела завадонесучого поля в розрахункові формули (3.31) і (3.43) підставляються такі вирази:

$Z_D^T = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ -характеристичний опір повітря електромагнітному полю;

$|Z_D^H| = \omega\mu_0 y$ - модуль характеристичного опору повітря магнітному полю;

$|Z_D^E| = 1/\omega\mu_0 y$ - модуль характеристичного опору повітря електричному полю;

y - відстань від джерела завадонесучого поля до екрана (ближня зона).

Враховавши, що еквівалентна глибина проникнення $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$, формули для розрахунку (в дБ) можна представити у вигляді

$$A = 8.69t/\delta, \quad (3.44)$$

$$B = 20 \lg \left| 1 - (|Z_D| - |Z_M|)^2 / (|Z_D| + |Z_M|)^2 \exp(-2t/\delta) \right|, \quad (3.45)$$

Для електромагнітного та електричного полів $|Z_D| \gg |Z_M|$, що дозволяє спростити формули для розрахунку R і B , дБ,

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_D}{4Z_M} \right|, \quad (3.46)$$

$$B = 20 \lg |1 - \exp(-2t/\delta)|, \quad (3.47)$$

Слід зазначити, що якщо $A > 4$ дБ, то впливом B можна знехтувати. При цьому результуюча ефективність екранування, дБ, визначається як

$$S \approx A + R, \quad (3.48)$$

Якщо ж $A \leq 4$ дБ, то $B < 0$.

Залежно від співвідношення еквівалентної глибини проникнення δ і товщини стінки екрану t частоти, при яких $t < \delta$, можуть бути умовно названі низькими, а частоти, при яких $t > \delta$, - високими. Розрахункові вирази ефективності екранування в області низьких і високих частот можуть бути спрощені.

В області низьких частот $\cosh|k|t \approx 1, \tanh|k|t \approx |k|t$ і згідно (3.31) загасанням за рахунок поглинання можна знехтувати, тобто.

$$S \approx 20 \lg \left[1 + 0.5 \left(\left| \frac{Z_D}{Z_M} \right| + \left| \frac{Z_M}{Z_D} \right| \right) |kt| \right] \quad (3.49)$$

Для квазіелектростатичного поля з урахуванням того, що $|Z_D^E/Z_M| \gg |Z_M/Z_D^E|$, відбиття в основному визначається першим кордоном діелектрик - екран і формула ефективності екранування (3.49) набирає вигляду

$$S \approx 20 \lg[1 + \sigma t / 2\omega \varepsilon_0 r] \quad (3.50)$$

Таким чином, ефективність екранування зростає зі збільшенням провідності екрану і його товщини і зменшується з ростом частоти квазіелектростатичного поля. При цьому ефективність екранування не залежить від магнітної проникності екрану. Так як провідність немагнітних металів вище провідності магнітних, останні гірше екранують квазіелектростатичне поле.

Для квазімагнітостатичного поля слід враховувати особливості магнітних властивостей немагнітних (мідь, алюміній, латунь) і магнітних (сталь, пермалой, ферит) металів.

3.3 Аналіз і обробка результатів моделювання

Прогнозування захисних властивостей плівкових покриттів здійснювалося в рамках моделі екранування плоскої електромагнітної хвилі одношаровим металевим екраном. Загальна ефективність екранування металевою пластиною A_0 (дБ) є сумою екранізування з допомогою поглинання енергії A_1 (дБ) в товщі d екрануючого матеріалу та A_2 (дБ), що визначає відбиттям від двох граней металевої пластини.

При цьому

$$A_1 = 8.69d\sqrt{(\pi\mu_a\sigma f)} \quad (3.51)$$

$$A_2 = 20 \lg \left(\frac{94.25}{\sqrt{\left(\frac{2\pi\mu_a f}{\sigma} \right)}} \right) \quad (3.52)$$

де: σ - питома провідність матеріалу, μ_a - абсолютна магнітна проникність; f - частота електромагнітного поля .

Наступні багаторазові відбиття хвилі всередині пластини не враховувалися, тому що їх внесок у втрати менше 5 дБ. Обчислення залежностей A_0 (дБ) від частоти f при товщині пластини d , відповідно, 1 мкм, 5 мкм, 15 мкм, 20 мкм, 50 мкм проводилися для Al, Ni, Fe . При цьому, залежності розраховувалися для довідкових значень питомого опору матеріалів, а значення μ були обрані для Ni - 1100. для Fe - 8000. Результати розрахунків наведені в таблицях 3.2-3.4, а на рис. 3.6-3.8. відповідно, графіки залежностей A_0 (дБ) від частоти для Al, Ni, Fe .

Таблиця 3.2 – Розрахункові сумарні втрати для пластин в залежності від частоти для Al

f (Гц) t (мкм)	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}	Примітки
1	146,0	126,1	106,1	87,1	76,4	Al $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\mu = 1$
5	146,0	126,1	106,6	91,2	117,6	
15	146,1	126,2	107,6	101,5	220,7	
20	146,1	126,3	108,1	106,7	272,3	
50	146,1	126,6	111,2	137,6	581,7	

Таблиця 3.3 – Розрахункові сумарні втрати для пластин в залежності від частоти для Ni

f (Гц) t (мкм)	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}	Примітки
1	111,5	91,7	73,6	72,7	243,3	Ni $\rho = 7,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\mu = 1100$
5	111,6	92,5	82,1	157,4	1090,7	
15	111,8	94,6	103,2	369,2	3209,1	
20	111,9	95,7	113,8	475,2	4268,3	
50	112,5	102,1	177,4	1110,7	10623,6	

Таблиця 3.4 – Розрахункові сумарні втрати для пластин в залежності від частоти для Fe

f (Гц) t (мкм)	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}	Примітки
1	101,5	82,0	66,4	90,3	509,6	Fe $\rho = 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\mu = 8000$
5	101,7	83,9	85,9	285,5	2462,1	
15	102,2	88,8	134,7	773,7	7343,2	
20	102,5	91,2	159,1	1017,7	9783,8	
50	103,9	105,9	305,5	2482,1	24427,4	

Побудуємо графіки по отриманим значенням.

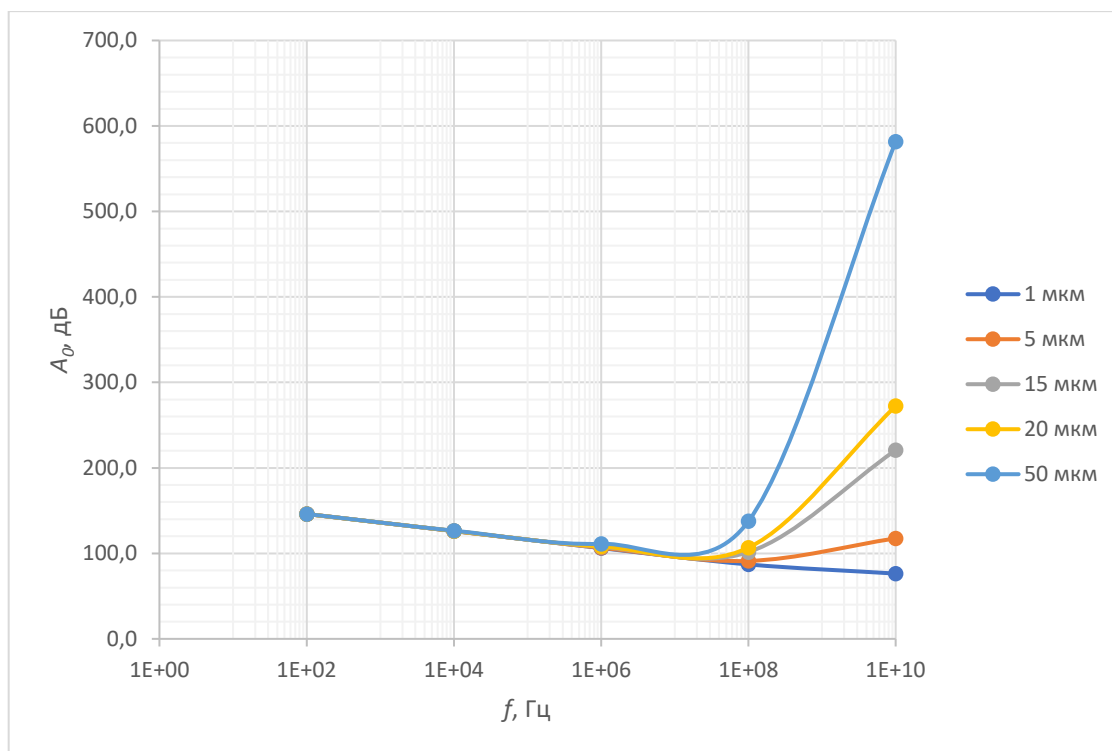


Рисунок 3.6 – Залежність ефективності екранування плівкового покриття із алюмінію різної товщини

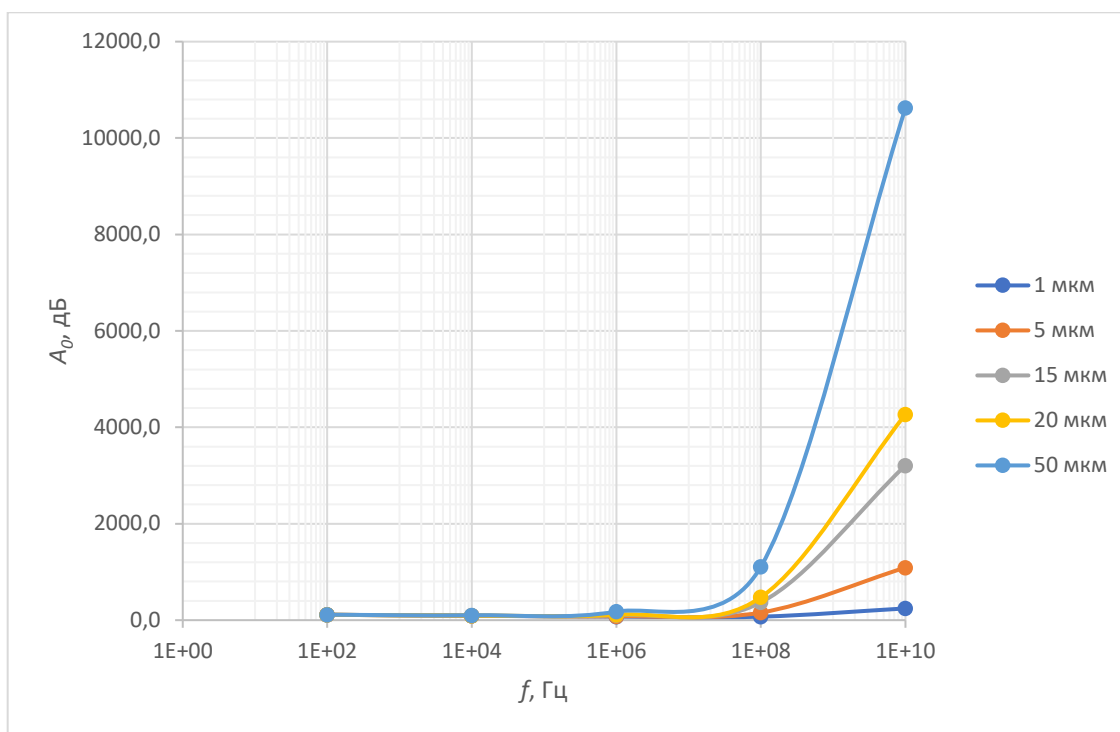


Рисунок 3.7 – Залежність ефективності екранування плівкового покриття із нікелю різної товщини

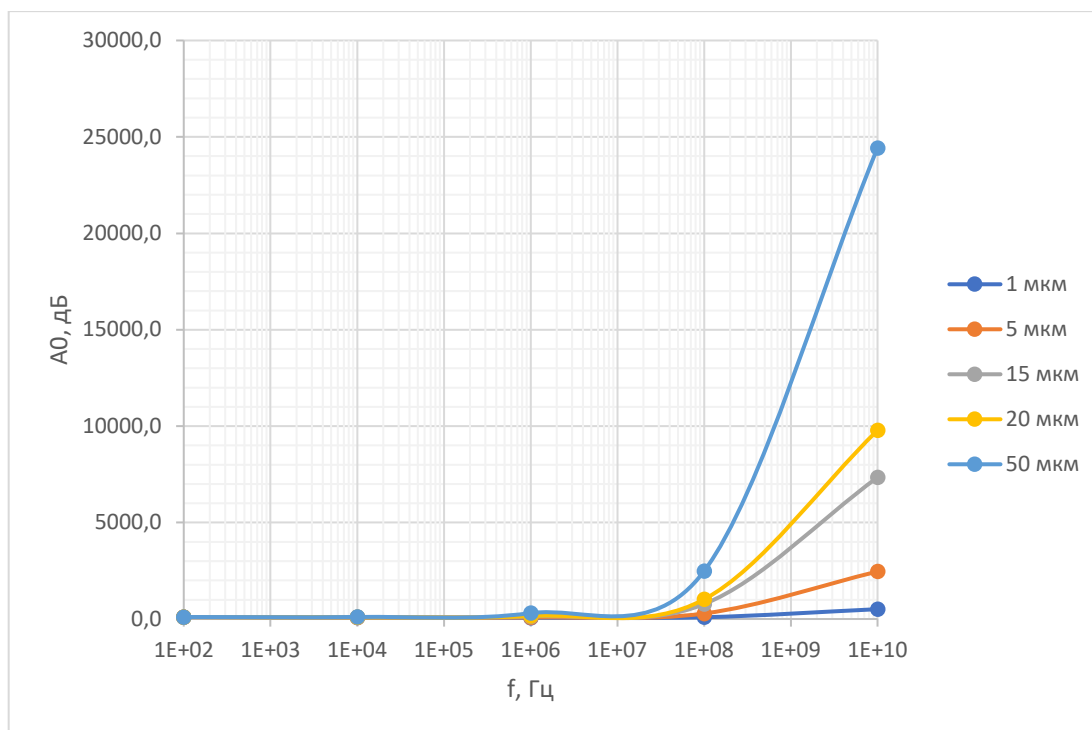


Рисунок 3.8 – Залежність ефективності екранування плівкового покриття із заліза різної товщини

Аналіз розрахункових даних (таблиця 3.2) і побудованих на їх основі залежностей (рис 3.6-3.8) показує, що в області частот до 1 МГц, а також для малих товщин покриттів ($d = 1 - 5$ мкм), основний внесок в ефективність екранування A_0 вносить відбиття електромагнітної хвилі (доданок A_2). В області частот $> 10^6$ Гц і при товщині екрануючої плівки $d > 5$ мкм переважаючим стає ефект поглинання (доданок A_1). Ефективність екранування тим вище, чим більше значення d, σ, μ екрануючого матеріалу.

При цьому, ефективність екранування E - поля можна забезпечити в широкому діапазоні частот, використовуючи високопровідні плівкові покриття, наприклад плівки алюмінію. Що стосується екранування H - поля, то найбільш ефективні феромагнітні матеріали з досить високим значенням магнітної проникності (наприклад, Fe, Ni)

Тому, з точки зору розширення частотного діапазону, найбільш оптимальними екрануючими покриттями є чергування провідних і магнітних тонкоплівкових шарів типу мідь - сталь, мідь - сталь - мідь, алюміній-сталь, алюміній - сталь - алюміній і ін. Ефективність екранування забезпечується за рахунок високої відбивної здатності високопровідного матеріалу (міді, алюмінію і ін.) і високої поглинаючої здатності магнітного матеріалу (стали, нікелю та ін.) При товщині плівкового екрануючого покриття меншого товщини скін-шару для відповідної довжини хвилі, основна частина ефективності екранування визначається ефектом відбиття від поверхні плівка - повітряний простір.

3.4 Аналіз і обробка результатів експерименту

Оскільки основною метою даної роботи було дослідження можливості екранування електронних пристроїв за допомогою технології тонких плівок, об'єктами експериментальних вимірювань були обрані екрани на основі тонких металевих плівок.

Для порівняння екрануючої дії плівок з різних матеріалів і різної товщини необхідно було забезпечити ідентичність геометричних факторів досліджуваних екранів. Тому нанесення різних екрануючих плівок здійснювалося на однакові тестові підкладки з полістиролу. Полістирол зазвичай використовується для виготовлення корпусів елементів, що було причиною його вибору як матеріалу підкладки. Розмір підкладок - 220x220 мм, усереднена товщина - 1,185 мм.

З теоретичних моделей слідує, що найбільшої ефективності екранування слід очікувати від плівок на основі матеріалів з низьким питомим об'ємним опором і високою магнітною проникністю. Виходячи з цього, а також по ряду технологічних причин, як матеріали, що розпилюються з мішеней були обрані алюміній, мідь і сталь (залізо). Крім того, досліджуваний зразок екрану представляє собою фольгований міддю гетинакс для порівняння екрануючої

здатності суцільних і напилених плівок. Перелік тестових зразків одношарових екранів і їх характеристик представлений в табл. 3.3.

Таблиця 3.5 – Тестові зразки і їх характеристики

№ зразка	Матеріал	t , мкм	ρ_v , Ом · см
1	Алюміній (0,9)	40	$2 \cdot 10^{-3}$
2	Алюміній (0,999)	10	$2 \cdot 10^{-4}$
3	–//–	15	$3 \cdot 10^{-4}$
4	–//–	30	–//–
5	–//–	45	–//–
6	–//–	60	–//–
7	–//–	75	–//–
8	Мідь	10	10^{-4}
9	Мідна фольга	50	$5 \cdot 10^{-4}$

Проаналізувавши вищенаведені експериментально отримані плівки, було виміряно їх фізичні параметри (товщину і питомий опір) табл. 3.3. Використовуючи отримані результати для різних плівок, були змодельовані залежності ефективності екранування в залежності від частоти і параметрів плівки. В результаті були отримані наступні дані :

Таблиця. 3.6 – Результати моделювання ефективності екранування тонких плівок

$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$		$f \text{ (Гц)}$ $t \text{ (мкм)}$	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}
$2 \cdot 10^{-5}$	Алюміній (0.9)	40	117,5	97,5	77,7	59,0	52,9
$2 \cdot 10^{-6}$	Алюміній (0.999)	10	127,5	107,5	87,6	68,7	59,7
$3 \cdot 10^{-6}$		15	125,7	105,8	85,9	67,2	60,7
		30	125,7	105,8	86,0	68,7	75,6
		45	125,7	105,8	86,2	70,2	90,6

Продовження таблиці 3.6

$3 \cdot 10^{-6}$	Алюміній (0.999)	60	125,8	105,8	86,3	71,7	105,5
		75	125,8	105,8	86,5	73,2	120,5
10^{-6}	Мідь	10	130,5	110,5	90,7	72,2	67,8
$5 \cdot 10^{-6}$	Мідна фольга	50	123,5	103,6	83,9	67,4	82,1

На основі вище наведених даних були побудовані наступні залежності ефективності екранування (рис. 3.9-3.11).

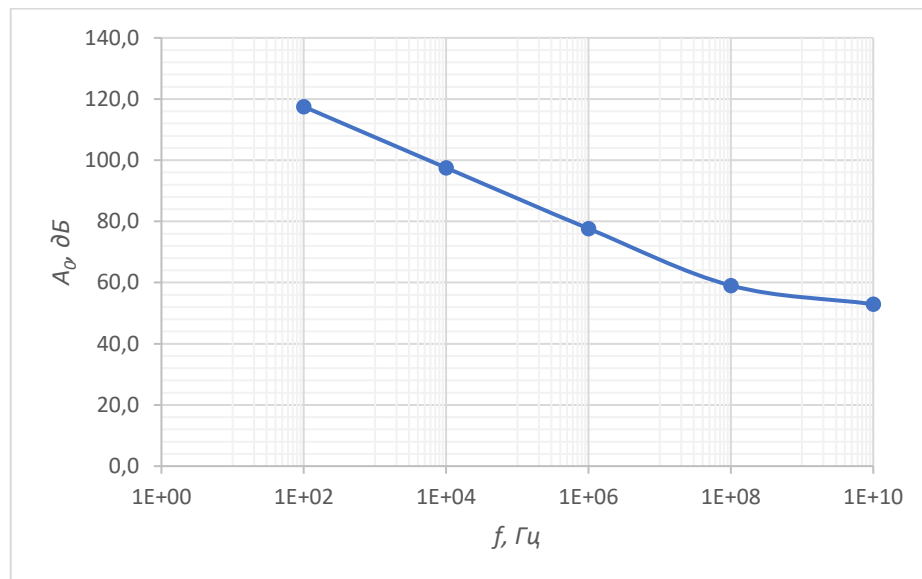


Рисунок 3.9 – Ефективність екранування плівки Al(0.9)

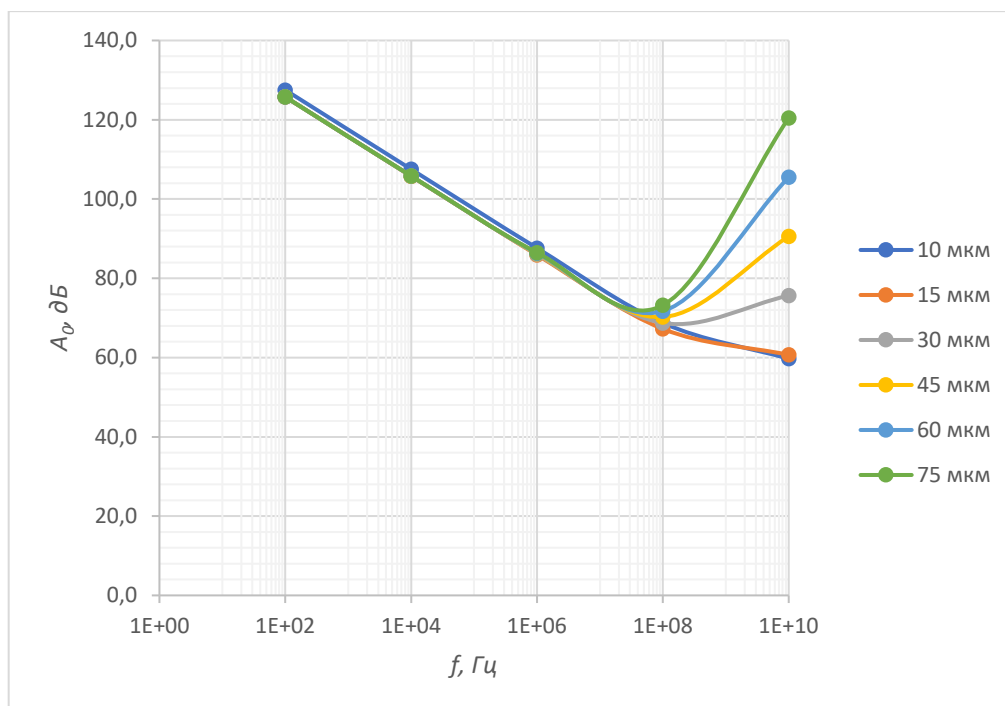


Рисунок 3.10 – Ефективність екранування плівки $Al(0.999)$

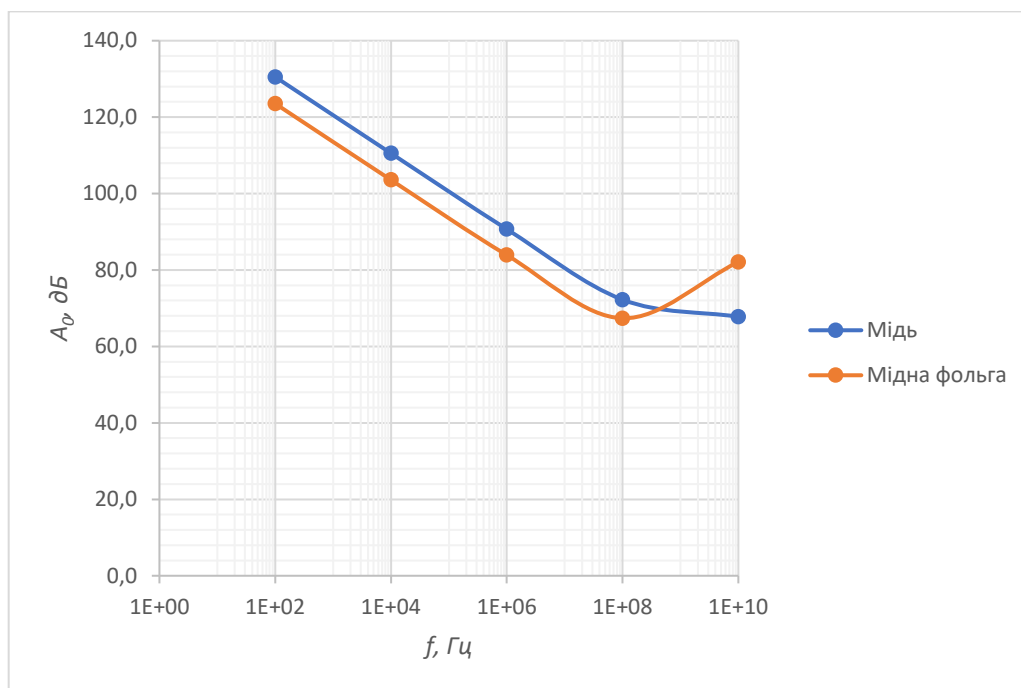


Рисунок 3.11 – Ефективність екранування плівки міді і мідної фольги

Аналізуючи результати можна прийти до висновків:

1. Металеві екрани при практично прийнятних товщинах забезпечують хорошу ефективність екранування на всіх частотах радіодіапазону в тому числі і на нижніх частотах радіомовлення.

2. Ефективність екранування збільшується зі збільшенням частоти, магнітної проникності, провідності і товщини екрану .

3. У діапазонах НВЧ товщина металевго екрана може мати кілька мікрометрів і виконуватися у вигляді тонкої металевої плівки нанесеною на екрануючий виріб.

4 При товщині екранів $d \ll \delta$ основна частина ефективності екранування A_0 металевих екранів визначається першими двома відбиваннями від їх поверхонь; при $d \gg \delta$, що має місце в діапазонах НВЧ, сильно зростає A_0 через втрати в товщині екрану.

5. Повторні відбиття в металевій товщі екрану практично не збільшують загальну ефективність екранування і їх можна не враховувати при проведенні розрахунків.

6. Велике значення загальної ефективності екранування $A_0 = A_1 + A_2$ допускає зменшення товщини екрану для низьких частот приблизно на порядок в порівнянні з глибиною проникнення. Це призводить до зменшення загасання екрану A_1 і зниження Z_{c2} , а отже, до підвищення загасання за рахунок відбиття A_2 . Однак останнє залишається досить великим для того, щоб забезпечити необхідну ефективність екранування в багатьох практичних застосуваннях.

7. У розглянутих випадках було прийнято нормальне падіння хвилі на поверхню екрану, але зі зміною поляризації і кута падіння будуть змінюватися коефіцієнт відбиття (збільшуватися) і коефіцієнт заломлення (зменшуватися), а отже, зміниться A_0 .

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання тонких металевих плівок для екранування	1. Військова галузь	Захист електронної апаратури від навмисних завад
	2. Електронні прилади та пристрої	Покращення електромагнітної сумісності
	3. Радіозв'язок	Запобігання перехресному впливу радіочастот

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Технічно-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари\концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	YSHIELD			
1	Товщина плівки	10 – 70 мкм	35 мкм			+
2	Затухання (при 1 ГГц)	50-60 Дб	19 Дб			+
3	Ціна	300 у. о \м ²	200 у. о \м ²	+		
4	Надійність	Висока	Висока		+	

4.2 Технологічний аудит проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Виготовлення тонкоплівкового покриття	Магнетронне розпилення	Наявна	Доступна
2		Електродугове нанесення	Наявна	Доступна
Вибрана технологія : електродугове нанесення				

4.3 Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	1-2
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	>120 тис. ум. од.
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Наявність погрібних технологій
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Потребує
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або но ринку), %	15

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Безпека, необхідність у електромагнітній сумісності компонентів	Державні установи мікро-електронних виробів, приватні підприємства.	Поведінку клієнта формує ринок та витрати на матеріали для їх синтезу, особливості купівлі та експлуатації товару полягають у техніці безпеки та продажу суб'єктам промислової діяльності.	Товар має застосовуватися в фабричному виробництві та бути економічно вигідним.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є науковим, тому необхідні кваліфіковані спеціалісти	Знаходження персоналу з досвідом роботи в цьому напрямленні
2.	Потреба в наявності ресурсів	Для налагодження виробництва необхідна наявність приміщень для безпосередньо виробництва та тестування працездатності продукту	Укладання договорів з науково-дослідними інститутами та поставниками ресурсів, оренда приміщень виготовлення та тестування продукту

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій	Рекламна діяльність, просування товару у тендерних закупівлях та міжнародних грантах

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції олігополія	На ринку присутня дуже мала кількість фірм	Вивід на ринок продукту, який є ефективнішим та більш універсальним і різноманітним
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнаціональний	Конкуренція не обмежена кордонами однієї країни	Ведучи конкуренцію на міжнаціональному рівні, потрібно враховувати тенденції на ринках різних країн
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Конкуренція проявляється в виготовленні товарів за схожими технологіями, у когось більш простими, без значних інвестицій, у когось більш технологічними	Пошук конкретних конкурентних переваг, що дозволять займати стійкі конкурентні позиції на даному ринку
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція зі схожим товаром	Представлення продукту, який би найбільше задовольнив споживача
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Нецінова: Споживач дивиться на якість, характеристики та зовнішній вигляд Цінова:	Головна перевага в характеристиках такого продукту, ціна співставна, але можливостей більше

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	YSHIELD	Бар'єри входу на ринок є порівняно незначними.	Існує залежність від постачальників.	Попит на товар напряму залежить від купівельної спроможності населення.	Є одна альтернатива, але не повна
Висновки	Лише один конкурент, товар якого має гірші можливості.	Вартість організації бізнесу досягає 100 тис. дол. Обов'язковою є сертифікація продукції.	Від постачальників залежить як якість, так і обсяги виробництва, так і ціна кінцевого продукту	Попит залежить від купівельної спроможності, сезонні коливання не виражені яскраво	Можна знайти альтернативу, але сукупність характеристик буде гіршою

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ціна	В такій ціновій ніші споживач менше орієнтується на ціну, а більше на якість товару або сукупність його характеристик; ціни співставні
2.	Якість	Суворий контроль за компонентами та відповідність вимогам
3.	Система розробки і впровадження нововведень	Можливість якнайшвидшого пропонування клієнтам нових технологій

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	15					+		
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	16					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	12			+				
4.	Економічний (ціна товару)	11			+				

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: сукупність функцій, яких немає у конкурентів, універсальність, гарантія якості	Слабкі сторони: більш повільне постачання клієнтам внаслідок більшої кількості перевірок
Можливості: ймовірність збільшення обсягів реалізації товару	Загрози: можливість підвищення цін на комплектуючі.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Ймовірність отримання ресурсів
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, створення реклами, взаємодія з органами інтернаціонального менеджменту та ринку збуту	60%	3
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення лабораторного обладнання та його закупівля, тестування	80%	5

Обрано альтернативу №2

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні фабрики, світові компанії	Готові	Високий	Низька	Середня
2.	Приватні підприємства	Готові	Високий	Низька	Низька
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1					

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
	Розробка різних за функціональністю версій	Задоволення якомога більшого сегменту ринку, врахування побажань та відгуків клієнтів	Головна конкурентоспроможна пропозиція полягає в унікальній сукупності якостей	Стратегія диференціації

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
	Номінально ні, категорія не нова, але конкурент лише один і його товар менш універсальний	50%/50%	Основні характеристики схожі для всіх товарів даної категорії	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувані комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Дотримання заявлених параметрів	Знаходження постачальників максимально якісних компонентів	Товар має чіткі характеристики та відповідає усім вимогам	Товар вартий своїх грошей, якість гарантовано, універсальність застосування

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Необхідність електромагнітної сумісності апаратури	Електромагнітна сумісність електронних компонентів	Гарні показники поглинання

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Виготовлення металевого тонкоплівкового покриття		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Діапазон робочих частот 2. Коефіцієнт поглинання 3. Товщина плівки 4. Надійність		
	Якість: відповідає вимогам стандартів		
	Марка : «metal film»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія, навчання, можливість оплати частинами, технічна підтримка.		
	Після продажу: доставка, обслуговування, утилізація , технічна підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: комплексне поєднання властивостей та характеристик			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	152 – 1100 у.о.	300000 у.о. і вище	200 – 1000 у.о.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Гуртове замовлення товару безпосередньо з виробництва	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Вибір найбільш привабливого і надійного продукту	Прямі – канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Якість, гарні характеристики	Показати всі переваги вдосконаленого продукту	Хороші характеристики та висока якість

ВИСНОВКИ

В роботі була розглянута проблема забезпечення електромагнітної сумісності електронної апаратури методом екранування тонкими плівками металу.

При виконанні роботи були отримані наступні результати:

1. Проаналізовано методи екранування електронної апаратури, методи захисту від зовнішнього і внутрішнього електромагнітного випромінювання. В якості методу для забезпечення електромагнітної сумісності електронних компонентів було обрано метод екранування поверхні тонкими металевими плівками.

2. Розглянуто метод екранування, як засіб для забезпечення електромагнітної сумісності електронної апаратури. Вивчено особливості впливу електромагнітного поля в ближньому і дальньому полі.

3. Запропонована модель розрахунку ефективності екранування одношаровим електромагнітним екраном. Проведено моделювання ефективності екранування для плівок алюмінію (Al), нікелю (Ni) і сталі (Fe). Показано, що в області частот до 1 МГц, а також для малих товщин покриттів ($d = 1 - 5$ мкм), основний внесок в ефективність екранування вносить відбиття електромагнітної хвилі. В області частот $> 10^6$ Гц і при товщині екрануючої плівки $d > 5$ мкм переважаючим стає ефект поглинання. Ефективність екранування тим вище, чим більше значення d, σ, μ екрануючого матеріалу.

4. На основі експериментальних значень для плівок алюмінію і міді визначені значення ефективності екранування. Установлено, що в діапазоні частот 10^2 Гц $\div 10^{10}$ Гц, за допомогою плівок товщиною $10 \div 75$ мкм спостерігається ефективність екранування від 60 дБ до 120 дБ. В діапазоні частот до 1 МГц зменшення товщини плівки не впливає на ефективність екранування,

при частотах $> 10^6$ Гц, зменшення товщини плівки зменшує ефективність екранування до 60 дБ.

5. Рекомендовано для забезпечення електромагнітної сумісності електронних пристроїв нанесення на їх конструктивні елементи плівок металів алюмінію і міді товщиною порядку $10 \div 75$ мкм, що дадуть можливість забезпечити доступні значення ефективності екранування в розмірі від 60 до 120 дБ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Кечиев, Л.Н. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / П.В. Степанов, Л.Н. Кечиев : – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.
2. Малков, Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 88 с. – ISBN 978-5-8265-0659-2.
3. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости/ А.Д.Князев, Л.Н.Кечиев, Б.В.Петров. - М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
4. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А.Д.Князев. - М.: Радио и связь, 1984. – 336.
5. Bohren Craig F. Microwave absorbing chiral composites: chirality essential or accidental / Bohren Craig F., Luebbers R., Langdon H // Appl. Opt. J. – 1992. -31, №30. – p. 6403-6407.
6. Чернушенко А. М. Конструирование экранов и СВЧ – устройств / А. М. Чернушенко, Б. В. Петров, Л.Г. Малорацкий. – М.: Радио и связь. 1990. – 352 с.
7. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник / А.Л. Бадалов, А.С. Михайлов. М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
8. Информационная безопасность офиса. Научно-практическое издание. Выпуск первый "Технические средства защиты информации". – К.: ООО "ТИД"ДС", 2003 – 216 с.
9. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции. / Т. Уильямс. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. – 540 с

10. Directive 2004/108/EC of the European Parliament and of a Council of 15 December 2004 on the approximation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility and repealing Directive 89/336/EEC (Text with EEA relevance) // Official Journal of the European Union. – 31.12.2004. – Vol 390. – P. 24-37
11. Версана В.Г. Техническое регулирование: Теория и практика» / В. Г. Версана. – М.; ЗАО Издательство «Экономика», 2006. – 308 с.
12. R & TTE Directive 99/5/EC of the European Parliament and of a Council of 9 March 1999 Radio equipment and telecommunications terminal equipment and the mutual recognition of their conformity // Official Journal of the European Union – 07.04.1999. – Vol. 91
13. Powell C.F. Vapour Deposition / C.F. Powell, J.H. Oxley, J.M. Blocher, Jr. – NY: JohnWiley, 1966. – 725 p.
14. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре /М.Л.Волин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1981. – 291 с.
15. Kelly P.J. Magnetron sputtering: a review of recent developments and application / P.J. Kelly, R.D. Arnell // Vacuum. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
16. Rossnagel S.M. Opportunities for Innovation: Advanced Surface Engineering./ S.M. Rossnagel // Switzerland: Technomic Publishing Co., 1995. - 186 p.
17. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы./ Б.С. Данилин, В.К. Сырчин М.: Радио и связь, 1982. - 72 с.
18. Ивановский Г.Ф. Ионно-плазменная обработка материалов.\ Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.
19. Ohring, M. Materials Science of Thin Films (2 ed.).\ Ohring, M\ : Academic Press. – 2001. – 794 p.
20. Жежеленко І. В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : підручник для магістрів / І. В. Жежеленко - :Нац. гірничий ун-т України. - Дніпропетровськ , - 2009. - 319 с.

- 21.Денисюк С.П. Електромагнітна сумісність та непрямі впливи на життєдіяльність людини. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності / С.П. Денисюк, І.П. Радиш, Д.С. Горенко,. Київ, 7 – 8 червня 2018. - 15–20 с.
- 22.Безменова Н.В. Обеспечение электромагнитной совместимости по магнитными полям промышленной частоты технических средств комплектных распределительных устройств систем электроснабжения: дис... канд. тех. наук: 05.09.03 / Н.В. Безменова. - Самара, 2012. -155 с.
- 23.Глива В.А. Моніторинг та нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем: дис... докт. тех. наук: 05.26.01 / Глива Валентин Анатолійович. -К., 2012. - 355 с.
- 24.Шидловський А. К. "Забезпечення електромагнітної сумісності в локальних електричних мережах./ Шидловський А. К //" Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях 26 2018 - 174-183 с.
- 25.Курило, А. А. "Аналіз існуючої нормативно-технічної бази із випробувань наземних радіолокаційних засобів на перешкодозахищеність та електромагнітну сумісність."/ А. А. Курило, Г. Г. Камалтинов. : Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України 2. 2011. - 73-76 с.
- 26.Бузов А.Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем.\ А.Л. Бузов М. А. Быховский, Н. В. Васехо. М.: Эко-Трендз 2006.- 376 с.
- 27.Корчагин, В. А. Проблемы электромагнитной совместимости цифрового электротехнического оборудования на промышленных и бытовых объектах.\ В. М. Артюшенко, В. А. Корчагин, : Вестник Ассоциации ВУЗов туризма и сервиса 4 2009. – 138 с.

28. Ефанов В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Учебное пособие. \ В.И. Ефанов Тихомиров А.А. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 228 с.
29. Уильямс Т. ЭМС для систем и установок / Т. Уильямс, К. Амстронг – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004 г. – 508 с.
30. Овсянников А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник / А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 196 с.
31. Л.Н. Кечиев ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Кечиев Л.Н., Степанов П.В. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 320 с.
32. Н.А. Логинов Актуальные вопросы радиоконтроля в Российской Федерации. / Логинов Н.А. – М.: Радио и связь, 2000 – 240 с